

# MODYFIKACJA METODY PROSTOWNIKOWEJ KÖNIGA DO POMIARU WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Inż. J. L. JAKUBOWSKI

**Streszczenie.** Opracowano pod względem teoretycznym i doświadczalnym układ do wyznaczania wartości szczytowej krzywej wysokiego napięcia, mającej więcej, niż jedno ekstremum w ciągu półokresu. Układ ten uzyskano przez włączenie kondensatora w szereg z jednym z prostowników układu prostownikowego, co daje efekt równoważny z włączeniem baterji o samoczynnie rosnącym napięciu.

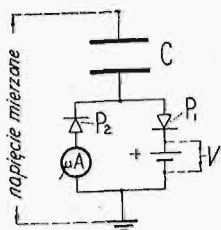
## 1. Omówienie zażądania.

Wykaz skrótów:

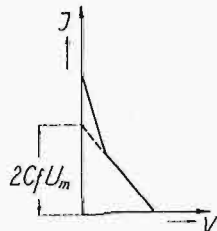
- P — prostownik,  
UP — układ prostownikowy,  
UPA — układ prostownikowy z automatycznie zmiennym napięciem.  
w. n. — wysokie (-go) napięcie (-a).

**M**ETODA prostownikowa tylko wtedy mierzy prawidłowo wartość szczytową  $U_m$ , gdy krzywa w. n. posiada w ciągu połowy okresu jedno ekstremum (krzywa jednowierzchołkowa [3], [12]). Główną zaletą metody prostownikowej jest prostota układu i postępowania pomiarowego. Otóż prawdopodobnie wogóle nie można tak zmodyfikować metody, aby utrzymać jej prostotę i jednocześnie rozszerzyć zakres mierzonych napięć na krzywe wielowierzchołkowe. Metoda zmodyfikowana, mniej prosta, niż zwykła, traci rację bytu, jako metoda do pomiarów bieżących w laboratoriach przemysłowych, wobec istnienia dużej liczby metod konkurencyjnych. Np. liczba metod pomiaru wysokiego napięcia i ich odmian, znanych autorowi, przewyższa 15. Przeciwnie, układy skomplikowane mogą być z powodzeniem stosowane w dziedzinach pomiarowych mniej rozwiniętych, np. przy badaniu rozkładów napięć. Z powyższego wynika, że przeszkody w rozszerzeniu zakresu stosowania metody prostownikowej są natury nie teoretycznej, ale praktycznej. Podanie zasady teoretycznej jest nawet zupełnie łatwe (np. przepuszczenie przez układ prostowników prądu zmiennego dodatkowego).

Jedyną próbą rozszerzenia zakresu stosowania metody prostownikowej jest próba Königa ([6], [13]). Aby wyznaczyć wartość szczytową w. n., gdy krzywa jest wielowierzchołkowa, a przebiegi napięcia w następujących po sobie okresach są ściśle powtarzalne (odkształcenia magne-



Rys. 1.  
Układ Königa.



Rys. 2.  
Krzywa  $I = \varphi(V)$  dla najczęściej spotykanych wielowierzchołkowych krzywych  $u = \varphi(t)$  (dwuwierzchołkowych).

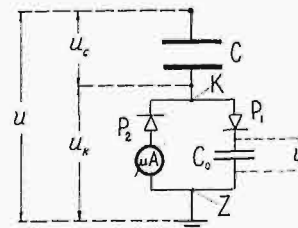
tyczne [14]), König włącza w szereg z jednym z prostowników źródło stałego napięcia  $V$  (rys. 1). Krzywa, wyznaczająca zależność wskazań mikroamperomierza  $I$  od wielkości  $V$ , składa się według badań Königa z tylu odcinków prostej, ile wierzchołków ma krzywa mierzonego napięcia w ciągu  $\frac{1}{2}$

okresu (rys. 2). Przedłużenie odcinka, przecinającego oś  $V$ , odcina na osi  $I$  wielkość  $2fCU_m$ , z której można obliczyć wprost  $U_m$ .

Aby zmierzyć  $U_m$ , trzeba zatem wyznaczyć krzywą  $I = \varphi(V)$ ; jest jasne, że technika pomiarowa zostaje wskutek tego b. skomplikowana [13]. To też metody Königa nie należy traktować, jako metody, przeznaczonej do pomiarów bieżących, ale jako metodę do sprawdzania prawidłowości działania zwykłych UP w laboratoriach, nie posiadających oscylografu. W tym zastosowaniu metoda ta mogłaby zyskać duże rozpowszechnienie, gdyby uprościć związane z nią postępowanie pomiarowe. Autorowi niniejszej pracy udało się znaleźć takie uproszczenie; polega ono na takiej zmianie UP, że napięcie  $V$  zjawia się samorzutnie i automatycznie rośnie, a prąd  $I$  maleje. (Układ prostownikowy z automatycznie zmiennym napięciem — UPA). Uproszczenie to będzie omówione szczegółowo w następnych rozdziałach.

## 2. Teoria UPA.

Idealny układ z automatycznie zmiennym napięciem (UPA) jest przedstawiony na rys. 3. Układ ten różni się od zwykłego UP włączeniem  $C_0$ . Idealność układu polega na tem, że oporności prostowników są równe 0.



Rys. 3.

UPA. Oznaczenia:  $P_1, P_2$  — prostowniki;  $C, C_0, C_k$  — kondensatory. Kondensator  $C_k$ , utworzony przez doprowadzenie do prostowników i osłonę tego doprowadzenia, należy sobie wyobrazić, jako włączony między punkty K i Z.

Dla zbadania sposobu działania UPA najlepiej przyjąć najpierw, że krzywa mierzonego napięcia jest jednowierzchołkowa (rys. 4) i że to napięcie włączono w chwili  $t_n$ . Do chwili  $t_1$  UPA działa, jak zwykły UP; w tej chwili prostownik  $P_1$  zaczyna być czynny, a jego prąd ładuje  $C_0$ . Jednocześnie ładuje się i pojemność  $C_k$ , gdyż spadek napięcia na  $P_1$  jest równy 0, a więc napięcie  $u_k$  na  $C_k$  jest równe napięciu  $v$  na  $C_0$ . Ładowanie zachodzi według wzoru

$$C \, d u_c = C_k \, d u_k + C_0 \, d v,$$

czyli

$$u_k = v = \frac{C}{C + C_k + C_0} (u + U_m).$$

W chwili  $t_2$ , t. j. gdy  $u = U_m$ ,  $u_k = \frac{C}{C + C_k + C_0} 2 U_m$ ;

dla skrótu ta wielkość będzie oznaczona przez  $V'$ .

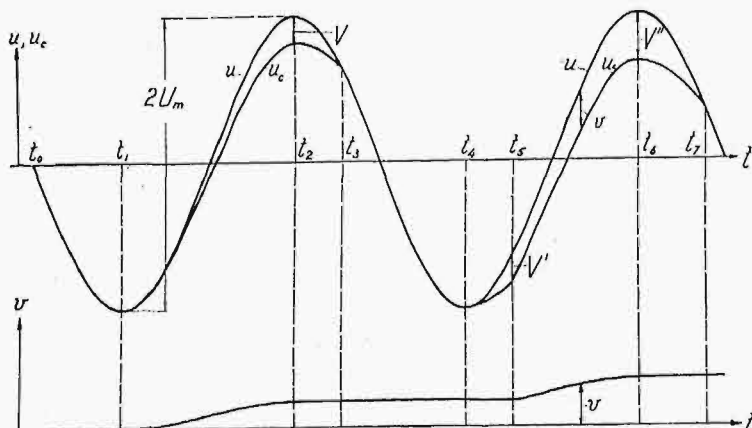
Od  $t_2$  do  $t_3$  przebiegi napięć i prądów są takie same, jak według teorii Königa ([6], [13]), o ile założyć w niej  $V = V'$ . Przez cały ten czas ładunek na  $C_0$  jest odcięty, gdyż  $P_1$  nie może działać. W chwili  $t_3$  napięcie na  $P_1$  staje się równe 0,  $P_1$  zaczyna więc przepuszczać prąd. Okres czynno-

ści  $P_1$  trwa do chwili  $t_0$ . W okresie  $t_5 \div t_6$  napięcie na  $C_0$  rośnie z tych samych przyczyn, co w okresie  $t_1 \div t_2$ . Napięciami rządzą równania:

$$C \left[ u_c - \left( \frac{C + C_k}{C} V' - U_m \right) + V' \right] = (C_0 + C_k)(u_k - V')$$

oraz  $u_k = v$ . W chwili  $t_6$  ( $u = U_m$ )

$$u_k = v = \frac{2 C U_m}{C + C_k + C_0} + \frac{C_0}{C + C_k + C_0} V' \equiv V''.$$



Rys. 4.  
Przebiegi  $u, u_c, v = \varphi(t)$  w UPA.

Z ostatniego wzoru widać, że napięcie  $v$  — stałe w okresach działania  $P_2$  i w okresach nieczynności obu  $P$  — rośnie w ciągu każdego okresu działania  $P_1$  i na jego końcu osiąga wartość  $\frac{2 C U_m}{C + C_k + C_0} + (v \text{ w poprzednim okresie nieczynności } P_1) \times \frac{C_0}{C + C_k + C_0}$ . Ilustruje to rys. 4. Stosownie do powyższego, napięcie  $v$  w okresach, gdy jest stałe (oznaczenie  $V$ ), można przedstawić za pomocą szeregu:

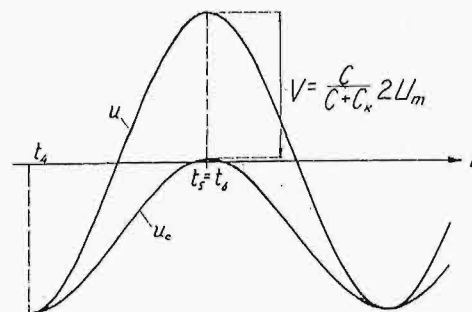
$$V = \frac{2 C U_m}{C + C_k + C_0} \left[ 1 + \frac{C_0}{C + C_k + C_0} + \left( \frac{C_0}{C + C_k + C_0} \right)^2 + \dots + \left( \frac{C_0}{C + C_k + C_0} \right)^n \right].$$

Szereg ten pozwala określić  $V$  dla  $n$ -tego okresu od chwili włączenia UPA, czyli dla czasu  $t = \frac{n}{f}$  ( $f$  — częstotliwość).

Z równania na  $V$  wynika, że gdy  $n$  rośnie, to i  $V$  rośnie. Oczywiście wzrost ten nie zachodzi nieograniczenie (choć nieskończenie długo), ustaje on z chwilą osiągnięcia prądu prostowników równego 0. Wtedy, jak łatwo udowodnić,  $V$  staje się równe  $\frac{2 C U_m}{C + C_k}$ . Przypadkowi temu odpowiada rys. 5.

Przechodząc do omówienia przebiegów prądowych, należy zauważyć, że w ciągu każdego okresu przebieg prądu w mikroamperomierzu (rys. 3) jest taki sam, jak w układzie K ö n i g a, a różnica polega tylko na tem, że  $V$  zmienia się skokami od jednego do drugiego okresu działania prostownika  $P_2$ . Zatem i zależność średniej wartości tego prądu ( $I$ ) od  $V$  musi być taka sama, jak u K ö n i g a; dotyczy to oczywiście przypadków krzywych jednowierzchołkowych i wielowierzchołkowych. Wynika stąd, że, mierząc w ostatnim przypadku odpowiadające sobie wartości  $V$  i  $I$ , można otrzymać cały przebieg  $I = \varphi(V)$ , konieczny dla określenia  $U_m$ . Oczywiście wielkości  $V$  i  $I$  zmieniają się podczas

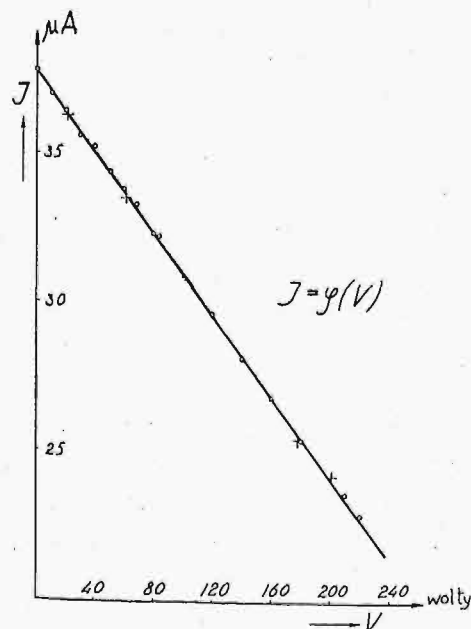
miaru samoczynnie; rola eksperymentatora ogranicza się tylko do wykonywania odpowiednich odczytów. Stąd przymiotnik „automatyczna” w nazwie metody. Brakiem tej metody nie jest zmiana  $V$  skokami, a więc możliwość otrzymywania tylko niektórych punktów krzywej  $I = \varphi(V)$ . W praktyce — ze względu na powolne ustawianie się woltomierza elektrostatycznego mierzącego  $V$  — skok  $V$  wybiera się tak mały (odpowiednie  $C_0$ ), że krzywą  $I = \varphi(V)$  można uważać za ciągłą.



Rys. 5.  
Przebieg  $u_c$  dla  $V = \frac{2 C U_m}{C + C_k}$ .

### 3. Sprawdzenie doświadczalne teorii UPA.

Sprawdzenie wykonano dla kenotronów, gdyż zjawiska występują tutaj w czystszej formie (przy stosowaniu prostowników świetlających wchodzi w grę uchyb wskutek napięć na tych prostownikach). Sprawdzenie przeprowadzono na dwóch drogach. Najprostszą drogą było bezpośrednie porównanie krzywych  $I = \varphi(V)$ , otrzymanych przy pomocy UPA i układu K ö n i g a. Wynik takiego sprawdzenia dla krzywej  $u = \varphi(t)$  jednowierzchołkowej przedstawia rys. 6. Zastosowano tu duże  $C_0$  (187,5  $\mu F$ ), co miało na celu uzyskanie



Rys. 6.  
Krzywa  $I = \varphi(V)$ . Stałe:  $I_0 = 2 f C U_m = 37,8 \mu A$ ,  $U_m = 60 \text{ kV}$ ,  $C + C_k = 1370 \mu F$ ,  $f = 50 \text{ okr/sek}$  (krzyżyki — punkty, określone układem K ö n i g a, kółka — punkty, określone UPA).

b. wolnego wzrostu  $V$ <sup>1)</sup> i umożliwienie przez to bezbłędnych odczytów woltomierza elektrostatycznego mierzącego  $V$ . Odczyt równoczesny  $V$  i  $I$  można było bez uchybu zastąpić w tych warunkach odczytami kolejnymi. Wracając do rys. 6, można stwierdzić, że zgodność przebiegów  $I = \varphi(V)$ , otrzymanych przy pomocy dwóch układów jest zupełna. Pomiar, którego wynikiem jest rys. 6, oraz szereg innych pomiarów tego samego rodzaju, nie omówionych w niniejszej pracy, stanowią najlepsze sprawdzenie teorii UPA.

Druga droga sprawdzenia, niezależna od pierwszej, polegała na wyznaczeniu doświadczalnym i ze wzoru teoretycznego zależności  $V$  od czasu  $t$ . Jest to sposób mniej odpowiadający warunkom działania UPA, gdyż wykrywa niedokładności czasowe, związane z absorpcją i przewodnością dielektryka  $C_0$ , które nie wpływają na jedynie miarodajny przebieg  $I = \varphi(V)$  (przebieg ten zależy tylko od wielkości każdorazowego napięcia  $V$ ).

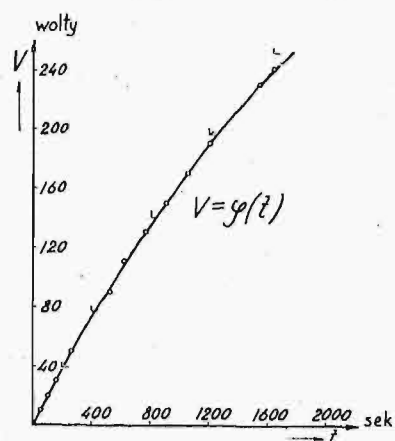
Do obliczenia przebiegu  $V = \varphi(t)$  nie nadaje się wprowadzony uprzednio szereg, wyznaczający  $V$ , gdyż dla  $C_0$ , mających znaczenie praktyczne, stosunek

$$\frac{C_0}{C + C_k + C_0}$$

jest praktycznie równy 1 (np.  $\frac{187,5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-12} + 10^{-9} + 187,5 \cdot 10^{-6}}$ )

Do wzorów dogodnych do obliczeń można dojść, określając sumę omawianego szeregu jako postępu geometrycznego, rozbijając ją na szereg Taylora, a następnie, po uwzględnieniu praktycznej pomijalności liczb 1, 2, 3, ... wobec  $ft$  ( $= n$ ), określając sumę owego szeregu Taylora:

$$\begin{aligned} V &= \frac{2CU_m}{C+C_k} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{C+C_k}{C_0} \right)^{-ft} \right] = \\ &= \frac{2CU_m}{C+C_k} \left[ ft \frac{C+C_k}{C_0} - ft \frac{(C+C_k)^2}{1 \cdot 2 \cdot C_0^2} + \right. \\ &\quad \left. + ft \frac{(C+C_k)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot C_0^3} - \dots \right] \approx \\ &\approx \frac{2CU_m}{C+C_k} \left[ ft \frac{C+C_k}{C_0} - \frac{(ft \frac{C+C_k}{C_0})^2}{2!} + \frac{(ft \frac{C+C_k}{C_0})^3}{3!} - \dots \right] = \\ &= \frac{2CU_m}{C+C_k} \left[ 1 - e^{-\frac{C+C_k}{C_0} ft} \right]. \end{aligned}$$

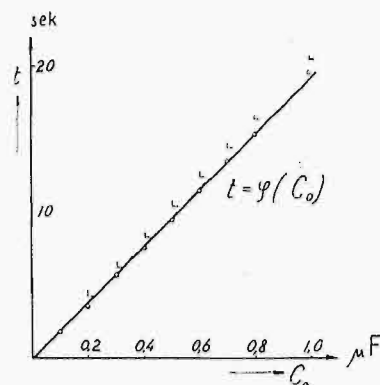


Rys. 7.

Krzywa  $V = \varphi(t)$ . Stałe:  $I_0 = 2fCU_m = 37,8 \mu A$  ( $U_m \approx 60$  kV),  $C + C_k = 1370 \mu F$ ,  $C_0 = 187,5 \mu F$ ,  $f = 50$  okr./sek. (L — punkty obliczone, O — punkty znalezione doświadczalnie).

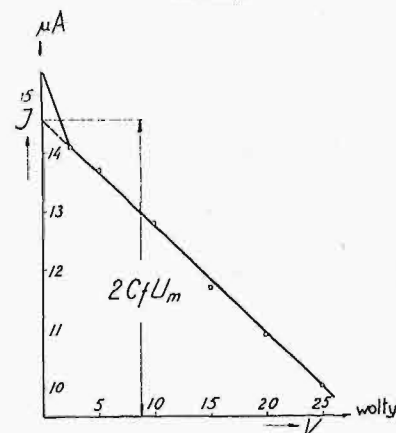
<sup>1)</sup> „Skok” napięcia  $V$  w ciągu okresu jest mniejszy od  $\frac{2CfU_m}{f(C+C_k+C_0)^2} \approx \frac{2CfU_m}{fC_0} = \frac{37,8 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 187,5 \cdot 10^{-6}} = 0,004$  V, praktycznie więc  $V$  zmienia się w danym przypadku w sposób ciągły.

Przy pomocy ostatniego wzoru obliczono punkty zaznaczone na rys. 7 i 8. Rys. 7 został otrzymany doświadczalnie w tych samych warunkach, co rys. 6, rys. 8 w warunkach nieco innych (małe  $C_0$ <sup>2)</sup>). Wykresy analogiczne do przedstawionego na rys. 8 otrzymano również dla  $U_m = 170$  V. W obu przypadkach punkty, znalezione doświadczalnie i ze wzorów, leżą prawie na jednej krzywej (na rys. 8 na prostej, gdyż dla  $C$ ,  $U_m$ ,  $f$ ,  $V$  stałych  $\frac{t}{C_0}$  musi być stałe). Niewielkie różnice



Rys. 8.

Krzywa  $t = \varphi(C_0)$ . Stałe:  $2CfU_m = 7,1 \mu A$  ( $U_m = 11,4$  kV),  $C + C_k = 1190 \mu F$ ,  $V = 83,8$  wolta,  $f = 50$  okr./sek. (L — punkty obliczone, O — punkty znalezione doświadczalnie).



Rys. 9.

Krzywa  $I = \varphi(V)$  dla przebiegu  $u = \varphi(t)$  dwuwierchołkowego.  $U_m = 23,3$  kV, uchyb wskutek wielowierchołkowości 1,5 kV. Punkt dla  $V = 2,5$  wolta otrzymany przy pomocy pomiaru rzędnej  $I$ , odpowiadającej chwili zmniejszenia się szybkości malenia  $I$ <sup>3)</sup> (pomiar  $V$  bezpośredni nie był możliwy przy pomocy stosowanego woltomierza). Z rysunku widać wyraźnie, że  $\frac{dI}{dV}$  dla odcinka górnego krzywej jest 3 razy większe, niż dla dolnego.

<sup>2)</sup> Ciekawa jest technika pomiarów, prowadzących do krzywej z rys. 8. Ponieważ napięcie  $V$  rosło b. szybko, nie można było użyć woltomierza elektrostatycznego. Wskaźnikiem osiągnięcia danego napięcia  $V$  było zapalenie się lampki świecącej (silnie oświetlonej dla usunięcia opóźnień). Czas mierzono sekundomierzem. Ważne jest zaznaczenie, że w razie załączenia lampki świecącej wprost na  $C_0$ , po zapłonie jej powstawały wyładowania relaksacyjne; gdy lampkę włączono między punkty K i Z (rys. 3), wyładowania te nie występowały.

<sup>3)</sup> Dla górnego odcinka krzywej  $I = \varphi(V)$  szybkość  $\frac{dI}{dV}$  jest prawie taka sama, jak dla odcinka dolnego. Ponieważ jednak  $\frac{dI}{dV}$  dla pierwszego odcinka jest 3 razy większe, niż dla drugiego, więc również  $\frac{dI}{dV}$  (jako równe  $\frac{dI}{dV} \frac{dV}{dt}$ ) musi być około 3 razy większe.

można zaliczyć na karb: częściowo niedokładności określenia wielkości wchodzących do wzorów teoretycznych, częściowo nieidealnej izolacji  $C_0$  (względ ostatni nie ma wpływu na przebieg  $I = \varphi(V)$ ).

Wyniki sprawdzenia teorii UPA, przedstawione na rys. 6 ÷ 8 można uważać za wystarczające. Odnoszą się one do krzywych jednowierzchołkowych  $u = \varphi(t)$ . Wobec zgodności krzywych  $I = \varphi(V)$  dla UPA i układu Königa, badania specjalne dla krzywych  $u = \varphi(t)$  wielowierzchołkowych są zbędne. Wystarcza oparcie się na wyczerpujących pomiarach Königa dla jego układu. Na tem miejscu zostanie tylko podany jako przykład przebieg  $I = \varphi(V)$ , zdjęty przez autora niniejszej pracy, typowy dla krzywych  $u = \varphi(t)$  dwuwierzchołkowych (rys. 9).

#### 4. Układ praktyczny i jego krytyka.

Układ praktyczny tem się różni od teoretycznego (rys. 3), że kenotrony, zastosowane w nim<sup>4)</sup>, nie mają idealnych własności, oraz że na  $C_0$  załączony jest woltomierz elektrostatyczny. Nieidealność prostowników jest przyczyną uchybów minimalnych w stosunku do uchybów wskutek wielowierzchołkowości w. n.

Posługiwanie się układem praktycznym nie wymaga wyjaśnień. W razie, gdyby czas czekania na dostateczne podwyższenie się  $V$  był zbyt długi, można dać na  $C_0$  napięcie początkowe (przez naładowanie  $C_0$  np. z baterji akumulatorów) — układ sam już się postara o dalszy wzrost  $V$ .

Pomimo, że teorie układu Königa i UPA różnią się w sposób istotny, wzory końcowe są jednakowe. Stąd pochodzą cały szereg cech wspólnych dla obu układów, np. nieprawidłowość działania, gdy UP posiada dużą upływność  $\frac{1}{R_k}$ . Cechy różniące układy są następujące:

1. Przy stosowaniu UPA unikamy dodatkowych źródeł napięcia i ich regulacji.

2. Przy stosowaniu UPA czas wyznaczania całej krzywej  $I = \varphi(V)$  jest dłuższy (rzędu 20 minut).

Cecha 1. jest niewątpliwie zaletą. Cecha 2. nie stanowi wady wobec tego, że układ jest przeznaczony nie do pomiarów bieżących w laboratorium, a do sprawdzania nowych instalacji pomiarowych. Zresztą czas pomiarów można dowolnie skracać, jak wzmiankowano wyżej, a całą krzywą  $I = \varphi(V)$  zdejmujemy się b. rzadko.

#### Zestawienie wyników i wniosków.

1. Wyprowadzono teorię, z której wynika, że przez włączenie kondensatora  $C_0$  w szereg z jednym z kenotronów układu prostownikowego można osiągnąć taki sam przebieg prądu, jak w układzie Königa. Różnica w działaniu obu układów polega na tem, że napięcie baterji  $V$  w układzie Königa jest stałe, a napięcie  $V$  na  $C_0$  rośnie w czasie według wzoru:

$$V = \frac{2 C U_m}{C + C_k} \left[ 1 - e^{-\frac{C + C_k}{C_0} t} \right].$$

Słuszność powyższego wzoru sprawdzono doświadczalnie.

2. Stwierdzono, że układ z  $C_0$  (t. zw. układ prostownikowy z automatycznie zmiennym napięciem) pozwala wyznaczyć w praktyce  $U_m$  krzywych wielowierzchołkowych, o ile wielkość  $C_0$  jest rzędu 100 — 200  $\mu$ F. Układ taki jest praktyczniejszy, niż oryginalny układ Königa, gdyż nie

<sup>4)</sup> Sposobu działania UPA z prostownikami świetlącymi narazie nie badano, jakkolwiek niewątpliwie można wyeliminować w tym przypadku nietylko uchyb wskutek wielowierzchołkowości krzywej  $u = \varphi(t)$ , ale i uchyb wskutek dużego (prawie stałego!) napięcia działania prostowników świetlających.

wymaga źródła napięcia  $V$  i urządzeń regulujących to napięcie.

Praca niniejsza została wykonana w Zakładzie Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć w 1934 r.

#### LITERATURA.

do artykułów: „Metoda prostownikowa z prostownikami świetlącymi” i „Modyfikacja metody Königa”.

W wykazie zamieszczono tylko prace, z których korzystał autor. Trzy prace, oznaczone \*, są znane autorowi tylko ze streszczenia.

#### 1. Metoda prostownikowa.

[1]\* Chubb, L. W. i Fortescue. Transactions A. I. E. E. 32, I/1913, str. 739.

[2] Whitehead, J. B. i Gorton, W. S. The electric strength of air — V. Trans. A. I. E. E. 1914, str. 951.

[3] Chubb, L. W. The crest voltmeter. Proc. A. I. E. E. 35/1916, str. 121.

[4] Haefely, E. Einrichtung zum Messen von Maximalwerten mittelst Messkondensators in Wechselstrom-Hochspannungskreisen. Patent szwajcarski Nr. 110309 r. 1924.

[5] König, H. Helvetica Physica Acta II/1929, str. 152.

[6] König, H. Ueber die Fehler der Scheitelspannungs - Messung vermittelt röhrengleichgerichtetem Kondensatorstrom. Helv. Phys. Acta II/1929, str. 357.

[7] Cauwenbergh, van, M. R. Quelques remarques sur la mesure des hautes tensions au moyen d'un courant de capacité redressé. Bull. des Ing. Bruxelles. 1929, Nr. 4.

[8] Jakubowski, J. L. Metody pomiaru wartości maksymalnej wysokiego napięcia ze szczególnem uwzględnieniem metod prostownikowych. Rękopis w Z. M. E. i W. N., 1930/31, str. 1 — 181, 1—235.

[9] Davis, R., Bowdler, G. W., Standring, W. G. The measurement of high voltages with special reference to the measurement of peak voltages. Journ. I.E.E. 68/1930.

[10] Cauwenbergh, van. La mesure des hautes tensions. Congrès Int. d'Electricité, Paris 1932.

[11] Witka, W. A. i Dmochowsky, W. W. Eine neue Methode zur Messung der Spannung an der Röntgenröhre. Fortschritte auf dem Gebiete d. Röntgenstrahlen. 45/1932, str. 78.

[12] Jakubowski, J. L. Pomiar wysokiego napięcia metodą prostownikową w laboratoriach przemysłowych. Przegląd El. 1933, Nr. 1 — 2. Publikacja Z.M.E. i W. N. Nr. 28.

[13] Drewnowski, K. i Jakubowski, J. L. O dokładności metody prostownikowej przy pomiarach wysokiego napięcia. Przegląd El. 1933, Nr. 3. Publikacja Z. M. E. i W. N. Nr. 29.

[14] Drewnowski, K. i Jakubowski, J. L. O prawidłowości działania metody prostownikowej pomiaru wysokiego napięcia. Przegląd El. 1933, Nr. 10. Publikacja Z.M.E. i W. N. Nr. 35.

[15] Drewnowski, K. i Jakubowski, J. L. Einige Betrachtungen über die kapazitive Hochspannungsmessung und deren Fehler. Archiv für El. XXVIII/1934, str. 8 — 15.



## 2. Własności elementów świetlających.

a) Układy inne, niż relaksacyjne.

[16] Palm, A. Die Glimmröhre als Spannungsnormale zur Messung von Spannungsscheitelwerten. Zeitschr. f. techn. Phys. 4/1923, str. 233 i 258.

[17] Kneser, H. Untersuchungen an einem Glimmlicht-Gleichrichter für Wechselstrom. Ann. d. Physik 72/1923, str. 519.

[18] Brockbank, R. A. i Ryall, L. E. Die Neon — Glimmlampe bei Wechselstrom. E. T. Z. 1924, str. 165.

[19] Seeliger, R. i Schmekel, J. Bemerkung über Gasentladungen bei sehr kleinen Stromstärken. Phys. Zeitschr. 26/1925, str. 471.

[20] Bär, R. Die Glimmentladung. Handb. d. Phys. Geiger - Scheel. 1927, XIV.

[21] Seibt, G. Das Glimmlichtrohr als Gleichrichter von Wechselströmen. E.T.Z. 1928, str. 1077.

[22] Güntherschulze, A. Elektrische Gleichrichter und Ventile. 1929, Berlin.

[23] a) Mierdel, G. Die Glimmentladung.

b) Seeliger, R. Allgemeine Eigenschaften der Entladungen. Handb. d. Exp. Ph. XIII, 3, 1929.

[24] Franck, S. Messentladungsstrecken (Ionenstrecken). Berlin, 1931.

[25] a) Ryall, L. E. The construction and operation of a simple neon-tube high-tension crest voltmeter. Journ. I. E. E. 1931, str. 898.

b) Discussion. Journ. I. E. E. 1931, str. 922.

[26] Summers, Claude, M. A theory of neon tube operation. Electr. Engineering. 1932, str. 772.

[27] Lohman, R. W. Neon tube characteristics. Electr. Engineering. 1933, str. 304.

[28] Leblanc (Discussion du rapport de). Les applications des tubes à effluves. Bull. S. F. des Electriciens. 1933, str. 204.

[29] Jakubowski, J. L. Zjawiska w rurach świetlających z zimną katodą. Przegląd El. 1933, Nr. 9 i 11.

b. Układy relaksacyjne.

[30] a) Würschmidt, J. Ueber diskontinuierlichen Entladungen in Entladungsröhren.

b) Ueber die sogenannte Kapazität von Entladungsröhren. Verh. Deutschen Phys. Ges. 11/1909, str. 300, 360.

[31] \*) Wertheimer. Inaug. Dissert. Göttingen, 1911.

[32] Herweg, J. Schwingungen und Hysteresis bei Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XIII/1912, str. 633.

[33] Geffcken, H. Zündspannung und Stabilität der intermittierenden Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XXVII-1925, str. 21.

[34] Dällenbach, W. Zur Frage der Stabilität von Gasentladungen. Phys. Zeitschr. 27/1926, str. 101.

[35] Penning, F. M. Ueber die intermittierende Glimmentladung in Neon. Phys. Zeitschr. 27/1926, str. 187.

[36] Friedländer, E. Ueber Kippschwingungen, insbesondere bei Elektronenröhren. Arch. für El. 1926, str. 273.

[37] Valle, G. Die diskontinuierlichen Entladungen. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 473.

\*) Praca znana autorowi tylko ze wzmianki Gehrkego w Handb. d. Radiologie, Marxa. 1916, str. 198.

[38] Rothe, A. J. Zur Frage der Restionen in der intermittierenden Glimmentladung. Phys. Zeitschr. 31/1930, str. 520.

[39] Leyshon, W. A. Characteristics of discharge tubes under „flashing“ conditions as determined by means of the cathode ray oscillograph. Proc. Phys. Soc. London, 1930, str. 157.

[40] Jakubowski, J. L. Wyładowania relaksacyjne w układach z elementami świetlącymi. Przegl. El. 1934, Nr. 9.

## 3. Konstrukcja układów praktycznych.

[41] Giebe, E. i Zickner, G. Verlustmessungen an Kondensatoren. Arch. f. El. XI/1922, str. 109.

[42] Haefely, E. Messkondensator für Hochspannungszwecke. Patent niemiecki Nr. 394014, r. 1924.

[43] Schering, H. Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. 1924.

[44] Retzow, U. Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischen Darstellungen. 1927.

[45] Hoffmann, G. Elektrostatik. Handb. d. Exp. Phys. X. 1930.

[46] Hague, B. Alternating Current Bridge Methods. 1930, str. 134 i n.

[47] Keinath, G. Isolierung von el. Messgeräten. Arch. Techn. Mess. Lief. 6, 1931, I—027—1.

[48] Wagner, W. Les propriétés des matières isolantes électrotechniques et leur mesure. Congres Int. d'El. Paris, 1932.

[49] Drewnowski, K. Podstawy techniki wysokich napięć. 1933, zes. 1.

## 4. Metody pomiarowe.

[50] Busch, H. Eine einfache Ableitung der vollständigen Theorie des Oszillographen. Phys. Zeitschr. XIII/1912, str. 615.

[51] Zölllich, H. Prüfung von Messgeräten zur Aufzeichnung sich rasch verändernder Grössen. Wiss. Veröffentlich. Siemens Konz. 1920—22, zes. 1.

[52] Schering, H. Schwingungsinstrumente. Handb. d. Phys. Geiger-Scheel, XVI, 1927, str. 304.

[53] Blondel, A. A propos de la theorie des oscillographes et appareils indicateurs. Comptes Rendus, 187/1928, str. 921.

[54] Jaeger, W. Elektrische Messtechnik, 1922, Lipsk, str. 26.

[55] Metcalf, G. F. i Thompson, B. J. A low grid-current vacuum tube. Phys. Rev. 36/1930, str. 1489.

[56] Barlow, H. M. A new method of measuring the capacity of small condensers. Phil. Mag. (7), 11/1931, str. 184.

[57] Jakubowski, J. L. Nowe poglądy w dziedzinie pomiaru wysokiego napięcia iskiernikiem kulowym. Przegl. El. 1932, Nr. 10 i 11.

[58] PNE—35 (projekt). Pomiar wysokiego napięcia iskiernikiem kulowym. Przegl. El. 1932, Nr. 17.

[59]\* Waldorf. Amplifiers for precise oscillographic measurements. Journ. Franklin Inst. 213/1932, str. 605.

[60] Sewig, R. Gleichstrom — Verstärkung unter Verwendung von Elektronenröhren. Arch. f. techn. Messen. 1933, Z 634—1.

[61] Starnecki, B. Kilka słów o odbiornikach typu Loftin-White. Radjoamator, 1933, str. 60.

# SZKŁO, JAKO MATERJAŁ IZOLACYJNY W TECHNICIE WYSOKICH NAPIĘĆ

Inż. JERZY I. SKOWROŃSKI

**Streszczenie.** Podane są wyniki badań własności elektrycznych kilkunastu mas szklanych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na zastosowanie szkła do wyrobu izolatorów linowych wysokiego napięcia. Stwierdzono istnienie związku pomiędzy opornością skrośną, a innymi własnościami szkła, mającymi znaczenie w izolatorach, co może być miernikiem jakości masy szklanej. Poza tym, z rozważenia własności mechanicznych i cieplnych badanych szkła, wyciągnięto wnioski co do budowy izolatorów szklanych wysokiego napięcia.

## I. WSTĘP.

**S**ZKŁO, jako materiał izolacyjny, stosowane było od samego zarania elektrotechniki; zastosowanie jednak ograniczało się raczej do przyrządów fizycznych, nie do urządzeń elektrycznych w ścisłym rozumieniu. Przyczyną tego były obawy co do niewystarczającej odporności szkła na zmiany temperatury i małej wytrzymałości mechanicznej, zwłaszcza na uderzenie. Nie bez znaczenia była tu również higroskopijność powierzchni szkła, t. j. skłonność do skraplania wilgoci z otaczającego powietrza oraz skłonność do wietrzenia jego powierzchni pod wpływem czynników atmosferycznych. Z punktu widzenia techniki wysokich napięć ogromną wadą szkła była dawno zaobserwowana właściwość, że wytrzymałość dielektryczna szkła, badanego np. w postaci płytek maleje szybko z grubością badanej płytki. Zjawisko to znalazło dopiero wytłumaczenie w źródłowych badaniach I. Mościckiego, który wyjaśnił wpływ na zjawisko przebicia naprężeń i wyładowań krawędziowych i pracą tą położył podwaliny pod współczesne poglądy na wytrzymałość elektryczną dielektryków stałych<sup>1)</sup>. Wyniki swych badań uwienczył zastosowaniem praktycznym, budując kondensatory szklane wysokiego napięcia, które pod nazwą kondensatorów Mościckiego znalazły szybko zastosowanie w technice<sup>2)</sup>.

Do urządzeń napowietrznych, zwłaszcza wysokiego napięcia, szkło przenikało z trudem, aczkolwiek tam, gdzie było stosowane, dało dobre wyniki pracy<sup>3)</sup>. Pomimo to do tychczas jeszcze istnieje opór — zwłaszcza w Niemczech — przeciwko stosowaniu izolatorów szklanych w urządzeniach wysokiego napięcia<sup>4)</sup>. W Ameryce i Francji oraz częściowo we Włoszech, a nawet w Norwegii zastosowanie izolatorów napowietrznych szklanych daje wyniki bardzo dobre i, zwłaszcza po wojnie, izolatory szklane używane są do linii bardzo wysokiego napięcia, pracujących w warunkach wyjątkowo ciężkich, jak okolicach górskich, nadmorskich, w klimacie gorącym (np. linia 100 kV Tafjord Kraftselskap w Norwegji, 60 kV w Maroku i w. in.).

## Cel i zakres pracy.

W Polsce izolatory szklane wyrabiane i stosowane były dotychczas prawie wyłącznie do linii teletechnicznych, a samo szkło prócz tego ustępowało co do jakości lepszym wyrobom zagranicznym; jednakże nic nie stoi na przeszkodzie, aby izolatory szklane u nas również znalazły się na liniach

najwyższych napięć. Pożądane jest to przede wszystkim ze względu na gospodarczą samowystarczalność państwa, gdyż izolatory szklane w całości mogą być i są wykonywane z surowców krajowych, podczas gdy na przykład o porcelanowych tego, niestety, powiedzieć nie można. Z drugiej strony dobrze wykonane izolatory szklane nie ustępują porcelanowym, a pod niektórymi względami bezwzględnie je przewyższają, a więc stosowanie ich nie tylko nie obniża, ale podnosi bezpieczeństwo ruchu. Oczywiście, warunkiem koniecznym jest podkreślone wyżej dobre wykonanie izolatorów, — to jest zarówno odpowiedni kształt, jak i dobra masa szklana, staranna fabrykacja i wreszcie — troskliwa selekcja po wykonaniu.

Praca niniejsza stanowi właśnie próbę znalezienia odpowiedniego kryterium do oceny masy szklanej do izolatorów wysokiego napięcia i wyciągnięcia pewnych wniosków praktycznych co do budowy izolatorów szklanych. Ze względów zasadniczych punktem wyjścia były wymagania co do gotowego materiału, a więc zupełnie pominięcie procesów fabrykacyjnych. Z tego punktu widzenia, zdaniem naszym, powinny być również ujmowane wszelkie przepisy odbiorcze. Poza tym celem pracy niniejszej było stwierdzenie, czy u nas można wykonać dobrą masę szklaną do wyrobu izolatorów wysokiego napięcia. Szkło do innych celów elektrotechnicznych, np. kondensatorów, z zakresu naszych zainteresowań w niniejszej pracy wyłączamy.

Właściwości fizyczne i dielektryczne szkła badane były przez bardzo wielu badaczy i od bardzo dawna. Literatura, dotycząca tego tematu, jest bardzo obfita. A jednak mało można znaleźć prac, które traktowałyby ten materiał z punktu widzenia budowy izolatorów linowych (napowietrznych). Prace te są to bądź badania o charakterze fizyko-chemicznym, bądź — bardziej techniczne — dotyczą szkła jako dielektryku do kondensatorów, jako materiału konstrukcyjnego do lamp żarowych lub elektronowych i t. d. Chociaż z prac tych można wyciągnąć wiele wniosków praktycznych, jednak w naszym przypadku trzeba mieć na widoku całokształt pracy izolatora, uwzględnienie jednoczesne możliwie wszystkich czynników, jakim izolator podlega — i taki właśnie był kierunek niniejszych badań.

Zespół wymagań, jakie należy postawić materiałowi izolatorów napowietrznych, aby izolatory te zapewniały dobrą pracę, można podzielić na grupy następujące:

- 1) własności elektryczne,
- 2) własności mechaniczne,
- 3) odporność cieplna,
- 4) odporność na starzenie.

Dążeniem naszym było stwierdzenie czy istnieje łączność pomiędzy niektórymi przynajmniej z tych grup i czy zależność ta, jeżeli istnieje, jest prostą, czy odwrotną, a wreszcie, czy ocena tych własności może się ograniczyć do prób, bez konieczności przepisowywania pewnego składu szkła.

Główną uwagę zwrócono na *własności elektryczne i starzenie*; dwie inne własności szkła zależą w znaczniejszym stopniu od obróbki cieplnej i od kształtu, niż od masy szklanej, i dlatego trudne były do dokładniejszej oceny w naszych warunkach. Badania własności cieplnych i mechanicznych przeprowadzone były raczej dla uzupełnienia posiadanych wiadomości co do szkła izolatorowych, a nie dla badań porównawczych.

<sup>1)</sup> I. Mościcki, Badania nad wytrzymałością dielektryków. Roczn. Akad. Um., Kraków, I 1904, str. 34.

<sup>2)</sup> I. Mościcki, ETZ, 1904 r. Nr. 25 i 26.

<sup>3)</sup> ETZ, 1910 r. s. 718

<sup>4)</sup> Schering, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, str. 158. (W. Weicker).

Własności fizyczne szkła są związane przedewszystkiem z jego składem chemicznym. Przez odpowiedni dobór składników i ich stosunku można zmieniać własności te w szerokich granicach. Jednak w naszych warunkach, t. j. w przypadku szkieł izolatorowych, zakres możliwości znacznie się zwęża ze względu na realne warunki techniczne, a przedewszystkiem koszt wyrobu. Ze względu na posiadane w kraju surowce oraz ich cenę, wchodzi w rachubę właściwie tylko jeden typ szkła, a mianowicie szkło sodowo-wapniowe z domieszkami pewnych tlenków (głównie  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), trafiającymi zwykle spowodu zanieczyszczenia surowców lub też dodaniami celowo, — co, jak się przekonamy, może być bardzo wskazane. W każdym bądź razie nie możemy mieć krajowych izolatorów ze szkieł, na przykład, borowych lub potasowych; próbki szkła borowego były wykonane i badane tylko dla porównania.

Do wstępnych badań użyto początkowo pięć rodzajów mas typowych, stosowanych przez hutę do rozmaitych wyrobów. Z jednej masy, używanej normalnie do wyrobu izolatorów niskiego napięcia, wykonano próbki porowate o różnej ilości pęcherzyków, do sprawdzenia wpływu obecności pęcherzyków na własności mechaniczne i elektryczne. Następnie wykonano próbki z zestawów specjalnych: szkło silnie alkaliczne (nadmiar  $\text{Na}_2\text{O}$ ) i borowe (zawierające  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) oraz ze szkła, uzyskanego z przetopionych izolatorów pochodzenia zagranicznego. Wreszcie na podstawie tych badań ułożono szereg zestawów szkła w celu potwierdzenia wniosków z badań poprzednich co do wpływu poszczególnych składników oraz wykazania, że zapomocą różnych zestawów można uzyskać dobre wyniki, a więc np. przepisywanie w normach na izolatory składu szkła lub nawet zawartości niektórych tylko składników nie miałyby uzasadnienia. Jednocześnie uzyskano potwierdzenie badań niektórych innych badaczy.

Ogółem zbadano 18 rodzajów mas szklanych.

Wszystkie próbki do badań wykonywane były w sposób fabryczny w hucie produkującej izolatory<sup>\*)</sup>, co przedewszystkiem miało na celu wprowadzenie tych samych czynników i warunków dla próbek, co dla izolatorów, czego by się nie miało przy laboratoryjnym wykonywaniu próbek.

Tablica I.  
Zestawy ważniejszych badanych szkieł.

Znak	Skład teoretyczny wagowy w %						
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$
A	79,0	1,0	—	—	8,0	—	12,0
B	65,7	4,0	—	—	8,0	—	22,3
C	65,5	4,0	—	—†)	18,2	—	12,3
D	60,0	4,0	—	—†)	18,0	—	18,0
E	60,0	2,0	—	—††)	18,0	2,0	18,0
F	66,0	2,0	—	—††)	17,0	3,0	12,0
J	60,9	2,2*)	—	1,2	16,7	0,1	18,9**)
L	74,5	—	—	—	7,3	—	18,2
	69,4	1,2	—	0,1	7,5	ślady	21,8***)
N	76,2	0,75	—	—	8,45	—	14,6
	74	1,0	—	0,1	8,5	ślady	16,5***)
O	73,8	2,1	3,9	—	7,0	—	13,2
W	76,5	—	—	—	7,0	—	16,5
U	78	—	—	—	7,6	—	14,4
Z	67,6	3,0	—	—††)	17,0	—	12,4

\*)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnO}$ .

†) Prawdopodobna obecność  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  poniżej 0,1%.

††) Prawdopodobna obecność  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ok. 0,1%.

\*\*\*) Wynik analizy szkła przed przetopieniem; prawdopodobne jest pewne obniżenie się zawartości  $\text{Na}_2\text{O}$ .

\*\*\*\*) Wynik analizy (wykonał p. E. Weyberg).

\*) S. A. J. Stolle „Niemen”.

Tablica I zawiera składy ważniejszych z pośród mas badanych. Dla wszystkich mas, prócz „J”, zostały one obliczone z zestawu teoretycznego surowców. Szkło „J”, pochodzące z izolatorów zagranicznych, zostało poddane analizie. Dotyczy to również szkła „N” oraz „L”, co do którego zachodziła wątpliwość, że zawiera więcej sodu, niż to wynikało z zestawu. Z powodu braku analizy surowców nie można było uwzględnić obecności innych tlenków, przedewszystkiem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Można tylko o zawartości ich sądzić ogólnie ze względu na to, że obecność tlenków żelaza objawia się zabarwieniem szkła na kolor zielono-niebieski. Otóż szkło „I”, zawierające 1,2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , jest ciemno zielone, przy grubościach powyżej 2 cm — czarne. Szkło „N” i „L” — niebiesko-zielone, zawiera 0,1%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Wnosząc z zabarwienia szkieł „E”, „F”, „Z” zawierały one nieco powyżej 0,1%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , szkła „D” i „C” — poniżej 0,1; „O” i „A” — ślady  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a „W” i „U” (szkła zupełnie białe) wcale nie zawierały tlenków żelaza.

Z powyższych względów i ze względu na ewentualne omyłki przy ważeniu zestawu i t. d. tablica I ma wartość jedynie orientacyjną.

## II. WŁASNOŚCI ELEKTRYCZNE.

### A. Przewodność skośna.

Przewodność dielektryku jest jego podstawową własnością elektryczną. Związane są z nią również inne własności, jak na przykład wytrzymałość na przebicie (przebiecie t. zw. cieplne). W przypadku szkła, jak to niżej wykazemy, jest z nią ściśle związana również i przewodność powierzchniowa, a nawet odporność na starzenie się powierzchni. Dlatego w pracy niniejszej poświęcono jej szczególną uwagę. Ze względu na dogodność rachunku zamiast przewodności operować będziemy wyłącznie jej odwrotnością t. j. *opornością skośną właściwą* (w  $\Omega\text{cm}$ ), co zresztą stosowane jest dosyć powszechnie przy analogicznych badaniach.

Prac nad opornością właściwą szkieł było wykonywanych bardzo wiele, przytoczenie najważniejszych tylko wyników zabrałoby zbyt wiele miejsca, dlatego niżej ograniczymy się tylko do powołania się na prace pierwsze lub bezpośrednio nas interesujące.

Rozpatrzmy pobieżnie najważniejsze czynniki mające wpływ na przewodność szkła. Oczywiście, pierwsze miejsce zajmuje tu *skład chemiczny*. Należy jednak zauważyć, że zjawiska te nie są — pomimo wielu prac — tak zbadane, abyśmy na podstawie znajomości składu mogli zupełnie dokładnie określić własności szkła. Dzisiejsze bowiem wiadomości o budowie cząsteczkowej szkła są bardzo niedostateczne. Jedno jest w każdym razie pewne, że zupełnie błędne było dawniejsze określenie szkła, jako przechłodzonej cieczy, złożonej z mieszaniny bezpostaciowych tlenków. Tworzy ono raczej roztwory stałe prostych i złożonych krzemianów, glinianów, boranów i t. d. w kwasie krzemowym<sup>\*)</sup>. Oparto ten pogląd na spostrzeżeniu, że nie wszystkie własności są sumowalne. Te mianowicie, które źródło swe mają w jądrach atomowych lub w wewnętrznych warstwach elektronów, nie mogą być zmienione przez łączenie się atomów, są więc sumowalne; do takich należy na przykład pochłanianie promieni rentgenowskich. Te zaś własności, których źródła znajdują się w zewnętrznych warstwach elektronów, przy łączeniu się różnych atomów mogą ulegać zmianom i naogół sumowalne nie są. Do nich należy między innymi i przewodność skośna.

Przewodzenie dielektryków, jak wiadomo, może być dwojakie: albo o charakterze elektrolitycznym, t. j. jonowe, albo mieszane — jonowo-elektronowe. Już mija pół wieku,

\*) K. Thiene. Glas. str. 2.

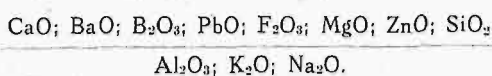


jak zostało stwierdzone przez Warburga<sup>7)</sup>, że przewodzenie szkła jest charakteru jonowego. W przewodzeniu tem biorą udział wyłącznie jony metali (przewodzenie jednokierunkowe), przede wszystkim jony metali jednowartościowych (sód, potas), przyczem tylko część zawartych w szkłe jonów bierze udział w przewodzeniu<sup>8)</sup>). Zdaniem niektórych badaczy przy bardzo dużych natężeniach pola występuje również i przewodzenie elektronowe, powstające rzekomo skutkiem jonizacji bodźczej, analogicznie do przewodzenia gazowego<sup>9)</sup>). Opierają się oni na tem, że istnieje zależność oporności właściwej od naprężenia dielektryku, wyrażająca się ogólnym wzorem

$$\ln \rho = a + bK,$$

gdzie  $K$  jest natężeniem pola, zaś  $a$  i  $b$  — stałe. Jak jednak wykazują inni, zależność ta daje się wytłumaczyć raczej zjawiskiem polaryzacji elektrolitycznej, a nie powstawaniem wolnych elektronów<sup>12)</sup>). Jakkolwiekby, zależność oporności od napięcia zachodzi przy tak dużych natężeniach pola (rzędu tysięcy kilowoltów na cm), że w warunkach technicznych nie ma ona znaczenia.

Wpływ poszczególnych składników ujmuje jakościowo Fulda<sup>13)</sup> w następujące dwa szeregi:



Składniki górnego szeregu *powiększają* oporność szkła, dolnego — *obniżają*. Stosunki ilościowe określał ten badacz (l. c.) na szeregach próbek, w których krzemionka ( $\text{SiO}_2$ ) zastępowana była przez coraz to większe ilości danego tlenku, przy trzecim składniku niezmiennym (był nim  $\text{PbO}$  względnie  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Wyniki stwierdziły, że zamiana  $\text{SiO}_2$  przez  $\text{K}_2\text{O}$  obniża b. silnie oporność; krzywa dla  $\text{Na}_2\text{O}$  przebiega równolegle, lecz jeszcze nieco niżej;  $\text{CaO}$  przeciwnie, podnosi oporność b. silnie; w słabszym stopniu podnoszą oporność  $\text{F}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  i  $\text{MgO}$ ; natomiast  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w nieznałym stopniu ją obniża. Pomiary te, jak wspomnieliśmy, wykonywane były przez porównanie z *krzemionką*, nas interesowałyby również zależności przy zamianie  $\text{Na}_2\text{O}$  przez inne składniki oraz jednoczesne działanie kilku tlenków, co w szklach technicznych zawsze ma miejsce. Przedewszystkiem zaś, najważniejszym zagadnieniem byłoby wykazanie, czy można uzyskać dobre szkło bez zbytniego obniżania zawartości  $\text{Na}_2\text{O}$  i powiększania  $\text{SiO}_2$ , t. j. bez dążenia do uzyskania szkła twardego, które nastrocza przy wyrobie trudności (trudniej daje się prasować, przedmioty po wyjściu z formy mają powierzchnię nierówną, pozatem twarde szkło ma skłonność do naprężeń wewnętrznych i t. d.). Na obniżenie punktu topliwości, a więc zmniejszenie szkła, wpływają również znacznie dodatki innych tlenków, jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , co do pewnego tylko stopnia można uwzględnić, gdyż  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wpływa również obniżająco na oporność, a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  silnie barwi szkło na zielono, tak że zawartość ponad 1—2% daje szkło prawie czarne, co nie jest pożądane.

<sup>7)</sup> Wiedem. Ann. 1884 r. s. 622.

<sup>8)</sup> Warburg i Tegetmeier, Wiedem. Ann. t. 35, s. 455, 1888 r.

<sup>9)</sup> Gehlhoff i Thomas, Zeit. f. techn. Phys. t. VI, s. 544, 1925 r.

<sup>10)</sup> H. H. Poole. The Nature of the Electrical Conductivity of Glass. Nature, 1921, s. 584.

<sup>11)</sup> Günther - Schultze. Elektronenabspaltung, durch Stossionisierung in Glas. Phys. Zeit. t. 24. 1923 r., s. 212.

<sup>12)</sup> Semenoiff i Walther. Die Physikalischen Grundlagen der elektrischen Festigkeitslehre, str. 72.

<sup>13)</sup> M. Fulda. Über das elektrische Leitvermögen der Gläser, Greifswald 1927 r.

Kwestję tę starano się w miarę możności uwzględnić przy układaniu zestawów, wykonywanych specjalnie (patrz Tablica I).

Tak na przykład szkła „L” i „B” posiadają zbliżoną i większą od innych mas ilość  $\text{Na}_2\text{O}$ ; „B”, „C” i „F” oraz „J”, „D” i „E” — tę samą ilość krzemionki, przyczem „B” i „C” mają prócz tego taką samą ilość  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a „D” i „E” — mają jednakową ilość  $\text{CaO}$  i  $\text{Na}_2\text{O}$ . „A” — wyróżnia się dużą zawartością krzemionki, „O” — obecnością  $\text{B}_2\text{O}_3$ , „E” i „F” —  $\text{MgO}$ , a „J” —  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i t. d.

Oczywiście wyniki z tak niewielkiej liczby zestawów są tylko orientacyjne jednak dają zupełnie pewne wskazanie, w jakim kierunku trzeba dążyć. Badania te mają tę zaletę w porównaniu z innymi pomiarami, że próbki wykonywane były w normalnych warunkach wyrobu izolatorów (prasowane), a więc i w ten sposób można było zorientować się co do jakości tego lub innego zestawu.

Poza składem, drugim czynnikiem, mającym wpływ na oporność, jest *temperatura*. Ze względu na charakter jonowy przewodzenia przewodność rośnie z temperaturą, gdyż z jednej strony wzrasta ruchliwość jonów, z drugiej — występuje większa dysocjacja elektrolityczna. Zależność oporności od temperatury na podstawie wielu badań ujmowano w różną postać funkcjonalną<sup>14)</sup>. Najczęściej spotykany jest wzór Rascha i Hinrichsena<sup>15)</sup>:

$$\ln \rho = \frac{A}{T} + B,$$

gdzie  $T$  jest temperaturą bezwzględną,  $A$  i  $B$  — stałe, zależne od szkła. Ważnym zjawiskiem jest fakt, że krzywe oporności w funkcji temperatury posiadają przebieg mniej więcej równoległy dla rozmaitych szkieł niezależnie od składu; ułatwia to znacznie ekstrapolację pomiarów.

*Wpływ czasu.* Oporność szkła, określona ze wzoru Ohma jako

$$R = \frac{U}{i}$$

nie jest wartością stałą w czasie, gdyż prąd maleje od chwili włączenia stałego napięcia. Prąd się ustala dopiero po pewnym czasie, zależnym od materiału. Czas ten jest tem dłuższym, im większą jest oporność właściwa materiału; dla kwarcu na przykład czas ten wynosi do kilku godzin<sup>16)</sup>.

Jak wykazał Joffe i inni<sup>17)</sup>, w dielektryku o budowie krystalicznej występuje polaryzacja i skutkiem tego powstaje siła elektromotoryczna, skierowana przeciwnie do napięcia przyłożonego. Prócz tego stwierdzono przy dłuższych przepływach prądu tworzenie się na powierzchni szkła warstwy źle przewodzącej, wskutek lokalnego wyczerpania jonów (głównie sodu) na drodze elektrolitycznej<sup>18)</sup>. W naszych pomiarach z tem zjawiskiem liczyć się nie potrzebujemy, ponieważ zaznacza się ono wyraźnie dopiero przy temperaturach wyższych.

Aczkolwiek w ten sposób oporność po ustaleniu się prądu nie jest właściwie opornością rzeczywistą (prawdziwą) materiału, jednak ze względu na trudności pomiarowe przyjęto zwykle uwzględniać tylko tę oporność ustaloną.

#### Pomiary.

Do pomiaru przewodności skrośnej zastosowano kształt próbki, wypróbowany przez autora przy innych podobnych

<sup>14)</sup> H. Thiene, l. c. str. 332.

<sup>15)</sup> Zeitschr. f. Elektrochemie t. 14, s. 41, 1908 r.

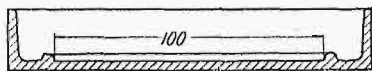
<sup>16)</sup> H. H. Race. Journ. A. I. E. E. Nr. 66, 1928.

<sup>17)</sup> Semenoiff i Walther, o. c. str. 63.

<sup>18)</sup> Günther - Schultze. Die Bildung Schlechtleitender Schichten bei der Elektrolyse des Glases. Ann. d. Phys. t. 37, s. 435, 1912.

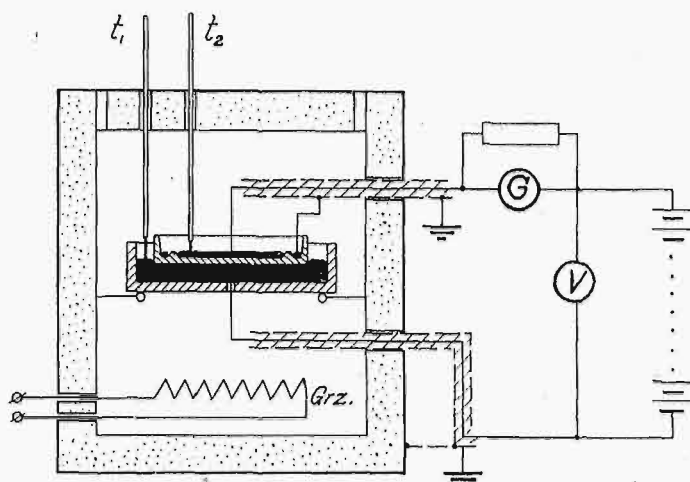


badaniach<sup>10)</sup>. Próbki były prasowane w odpowiedniej matrycy w ten sam sposób, jak są wykonywane izolatory szklane i t. p. wyroby. Każdego rodzaju (zestawu) wykonano ok. 10 sztuk próbek. Jako elektrod używano rtę-



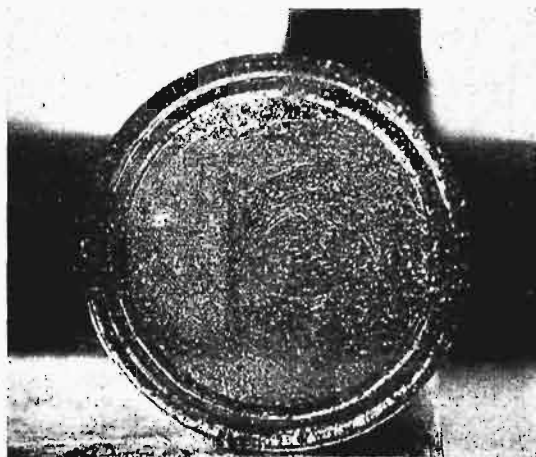
Rys. 1.  
Kształt próbek badanych.

ci. Dla kontroli niektóre z próbek zaopatrzone w elektrody posrebrzane; wyniki okazały się nieco niższe (mniejsze  $\rho$ ) dla próbek srebrzonych, a więc prawdopodobnie pomiędzy rtęcią i próbką pozostaje warstwa powietrza. Ale stosowanie elektrod rtęciowych przedstawia takie zalety (prze-



Rys. 2.  
Schemat układu pomiarowego.

wszystkiem dogodny pomiar temperatury próbek), że wszystkie pomiary były wykonywane z niemi. Błąd przytem popelniony nie ma większego znaczenia, gdyż chodzi nam o wartości porównawcze, a nie absolutne,



Rys. 3.  
Próbka porowata (P-II).

Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys. 2.

Próbka znajdowała się w termostacie, grzanym elektrycznie. Pomiar odbywał się metodą odchyłową przy użyciu galwanometru firmy Cambridge  $7 \cdot 10^{-11}$  A/mm, 2 000  $\Omega$ ,

oraz baterji 1 200 V, którą wrazie potrzeby można było uzupełnić do 2 000 V. Dla wyższych temperatur i dużych przewodności korzystano z części baterji. Do obliczania oporności brano wartości odchylenia po ustaleniu się prądu, co dla najwyższych oporności następowało po 10 minutach i więcej. Dla temperatur wyższych ponad otoczenie wykonywano szeregi pomiarów w pobliżu każdego punktu, przy nieznacznym wzroście i obniżeniu temperatury, przytem po ustaleniu się wskazań termometrów. Ze wskazań obu termometrów (górna i dolna elektroda) przyjmowano średnią, jako temperaturę próbki. Pomiary w pobliżu temperatury otoczenia powtarzano po ostudzeniu próbki.

Wobec wprowadzenia pierścienia osłonowego pomiar daje wyłącznie oporność skrośną. Oporność właściwą obliczano jako

$$\rho_t = \frac{R_t S}{a}$$

gdzie  $R_t$  jest opornością zmierzoną,  $a$  grubością przeciętną płytki,  $S$  — powierzchnią czynną, obliczoną z wymiarów. Uchylb ze względu na pomiar wymiarów geometrycznych próbki starano się możliwie zmniejszyć przez staranny pomiar mikrometrem grubości w wielu punktach; średnica była we wszystkich próbkach ta sama, natomiast powierzchnia czynna zmieniała się nieco przy większej lub mniejszej ilości rtęci wewnątrz próbki. Wpływ ten usuwano przez nalewanie zawsze tej samej ilości rtęci. Przy zachowaniu tych ostrożności pomiary na różnych próbkach tej samej masy dawały naogół wyniki zgodne.

Uchylb graniczny jest dosyć duży, jak zwykle przy pomiarach tego rodzaju, i wzrasta z opornością mierzoną skutkiem wzrostu uchylbu spostrzeżenia przy małych wychyleniach galwanometru, oraz większego wpływu uchylbu systematycznego ze względu na izolację układu (poniżej 0,3 podziałki). Największym źródłem uchylbów jest pomiar temperatury, wobec ogromnej zmienności oporności z temperaturą. Dlatego pomiary nie można było wykonywać w czasie wzrostu lub opadania temperatury, a tylko po dostatecznem się jej ustaleniu. Niektóre pomiary kontrolne wykonywano po kilkugodzinnem trzymaniu próbki w pewnej stałej temperaturze. W najgorszych warunkach uchylb graniczny całkowity mógł przekraczać 20%, co jednak nie miało większego znaczenia ze względu na sam charakter wykładniczy mierzonej wielkości (p. wykres).

Wyniki podane są w Tablicy II i na wykresie rys. 4. Przedewszystkiem widoczne są z nich znaczne różnice, jakie

Tablica II.

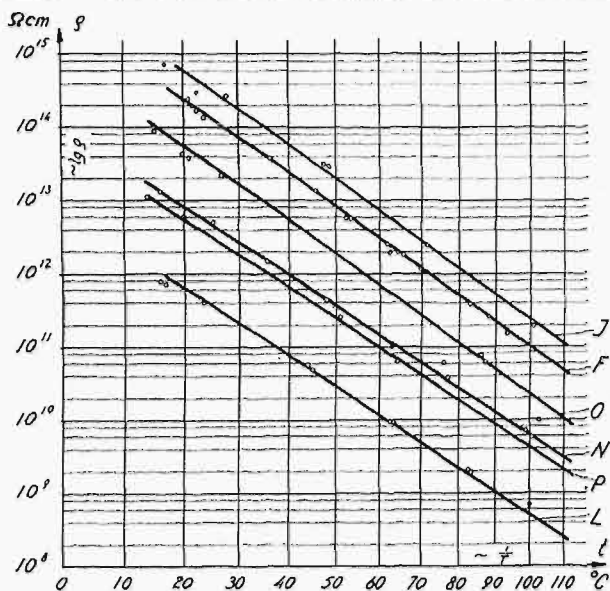
Oporność właściwa skrośna różnych mas szklanych przy temperaturze 20° (liczby zaokrąglone).

Znak	$\rho$ 10 <sup>12</sup> $\Omega$ cm	Charakterystyka
A	11	twarde
B	0,8	alkaliczne
C	70	z tlenkiem glinu
D	80	" "
E	60	" magnezu
F	250	" "
J	600	z tlenkiem żelaza, b. ciemne
L	0,6	alkaliczne
N	8	normalne izolatorowe niskiego nap.
O	50	borowe
P-I	5	porowate
P-II	7	silnie porowate
R	10	barwne, mniej alkali, niż W
U	5	białe
W	1	" "
Z	100	izolatorowe wysokiego napięcia

<sup>10)</sup> Conf. Gr. R. El. 1931 r. Nr. 29.

dają się uzyskać przez względnie niewielkie zmiany składu: pomiędzy skrajnymi wartościami w tej samej temperaturze zachodzi stosunek 1:1000.

Z porównania tablic I i II widzimy, że dla przewodności skrośnej szkła nie ma znaczenia absolutna ilość krzemionki ani tlenku sodu. Szkła o dużej zawartości  $\text{SiO}_2$  — twarde — („A”) nie posiadają najlepszych własności, z dru-



Rys. 4.  
Zależność oporności od temperatury.

giej zaś strony większa ilość jonów sodu może być jakgdyby związana przez obecność innych tlenków, zwłaszcza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  („I”, „F”). Również duże znaczenie dla podniesienia oporności właściwej posiada  $\text{CaO}$  oraz — co w naszych warunkach nie mogłoby praktycznie mieć zastosowania —  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Jest to w zgodzie z wynikami prac wyżej cytowanych.

### B. Stratność.

Z punktu widzenia techniki wysokich napięć przy ocenie materiału izolacyjnego większe znaczenie od przewodności posiada jego *stratność*. Do czynników, mających zasadniczy wpływ w przypadku przewodności — składu i temperatury — dochodzi tu jeszcze częstotliwość, skutkiem zjawiska absorpcji dielektrycznej. Ze względu na zakres naszych zainteresowań — prądów silnych o częstotliwości technicznej — pomiary ograniczyliśmy tylko do tych częstotliwości. Badań przy większych częstotliwościach nie brak w literaturze, do której musimy odesłać zainteresowanych<sup>20)</sup><sup>21)</sup><sup>22)</sup>.

Przy prądzie zmiennym miarą jakości izolacyjnej dowolnego izolatora lub układu izolacyjnego jest *upływność*, wyrażająca się, jako<sup>23)</sup>:

$$A = 2\pi f C \operatorname{tg} \delta$$

gdzie  $f$  jest częstotliwością,  $C$  — pojemnością układu,  $\delta$  — kątem, dopełniającym kąt przesunięcia fazy prądu względem napięcia, czyli t. zw. kątem strat dielektrycznych. Dla danego układu dielektrycznego

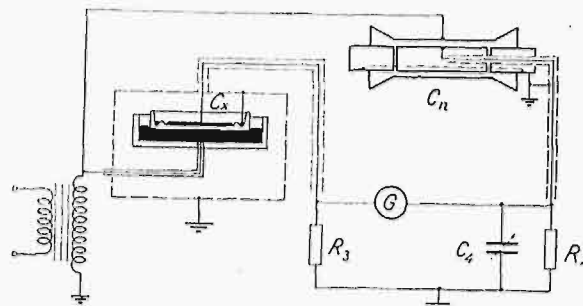
$$C = \varepsilon C_0$$

gdzie  $\varepsilon$  jest stałą dielektryczną materiału,  $C_0$  — jego pojemnością geometryczną; wobec tego:

$$A = 2\pi f C_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta = k \cdot \varepsilon \operatorname{tg} \delta$$

t. j. miarą upływności jest iloczyn stałej dielektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych; nazwiemy go *spółczynnikiem upływności*.

Pomiary wykonywane były na tych samych próbkach i w tym samym termostacie, co i pomiary oporności skrośnej, metodą mostku Scheringa (rys. 5). Przed wykonaniem pomiarów właściwych przeprowadzono badania wpływu elektrod i napięcia, przyczem stwierdzono, że elektrody rylcowe są najlepsze, a pozorny wzrost strat ze wzrostem napięcia pola spowodowany jest wyłącznie ogrzewaniem się próbki pod wpływem strat dielektrycznych. Przy dalszych pomiarach stosowano napięcie 4 do 5 kV, co odpowiadało — zależnie od grubości próbki — naprężeniom 8 do 15 kV/cm.



Rys. 5.  
Schemat mostku.

Wyniki pomiarów podane są w tablicy III oraz na wykresach rys. 6 i 7.

Tablica III.

Spółczynnik strat dielektrycznych, stała dielektryczna i współczynnik upływności dla różnych mas szklanych przy 20° C i częstotliwości 50 okr./sek.

Znak	$\operatorname{tg} \delta$	$\varepsilon$	$\Delta$	Znak	$\operatorname{tg} \delta$	$\varepsilon$	$\Delta$
A	0,040	7,8	0,31	N	0,040	8,15	0,33
B	0,095	9,85	0,93	O	0,027	7,60	0,21
C	0,028	8,6	0,24	P—I	0,044	8,12	0,36
D	0,020	9,0	0,18	P—II	0,042	8	0,35
E	0,021	8,95	0,19	R	0,044	8,1	0,36
F	0,018	8,5	0,15	U	0,067	8,45	0,57
J	0,016	8,15	0,13	W	0,050	7,9	0,40
L	0,095	9,75	0,93	Z	0,020	8,6	0,17

Porównyując tablicę II i III, stwierdzamy zgodność upływności z przewodnością; różnica jednak zachodzi w rzędzie wielkości stosunku mas dobrych do złych. Tak na przykład stosunek przewodności skrośnych dla mas „L” i „J” wynosi około 1000, a stosunek odpowiednich współczynników upływności — zaledwie ok. 7. Wobec tego, wydaje się praktyczniejsza — jako czulsza, choć mniej dokładna od mostkowej — metoda oceny jakości szkła przez pomiar oporności skrośnej. Z wyników, podanych na wykresach, widzimy, że znaczny wzrost strat wraz z temperaturą dla mas gorszych i przy większych naprężeniach, może prowadzić w rezultacie do przebicia, a to wskutek zakłócenia równowagi cieplnej układu. Takie typowo cieplne przebicie uzyskane zostało w czasie pomiarów dla naprężenia 25 kV/cm<sup>24)</sup>. Przy takim naprężeniu zależnie od temperatury otoczenia (i oczywiście od warunków chłodzenia próbki, a więc elektrod, kształtu i t. d.) straty powodują mniejszy lub większy przyrost temperatury

<sup>20)</sup> L. T. Wilson. A Study of telephone line insulators. Journ. A. I. E. E., 1930, 128.

<sup>21)</sup> M. J. O. Strutt. Diel. Eigensch. verschied. Gläser in Abhängigkeit der Frequenz und der Temp. A. f. E., 25, s. 715.

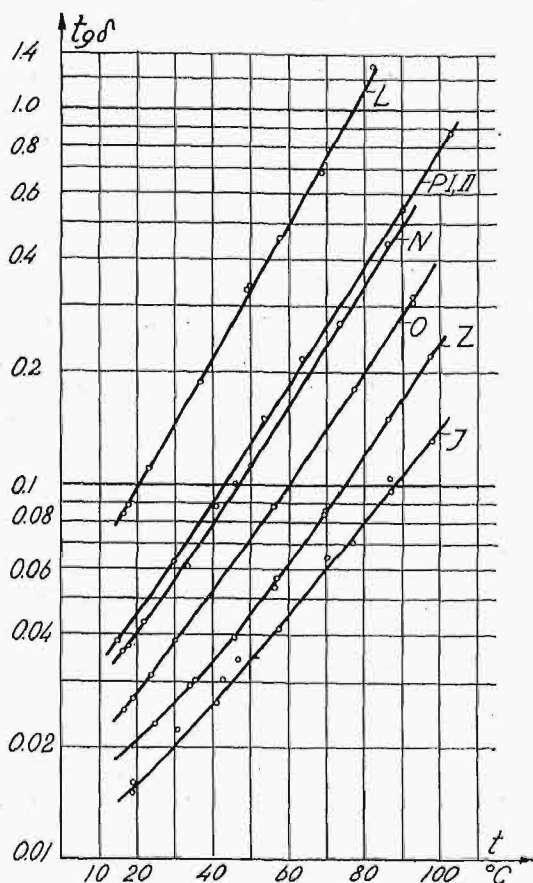
<sup>22)</sup> E. Möller, A. f. E. 15. 1926. s. 16.

<sup>23)</sup> K. Drewnowski. Podstawy techniki wysokich napięć, str. 129.

<sup>24)</sup> Pomiary te wykonał inż. Cyryl Sulc.

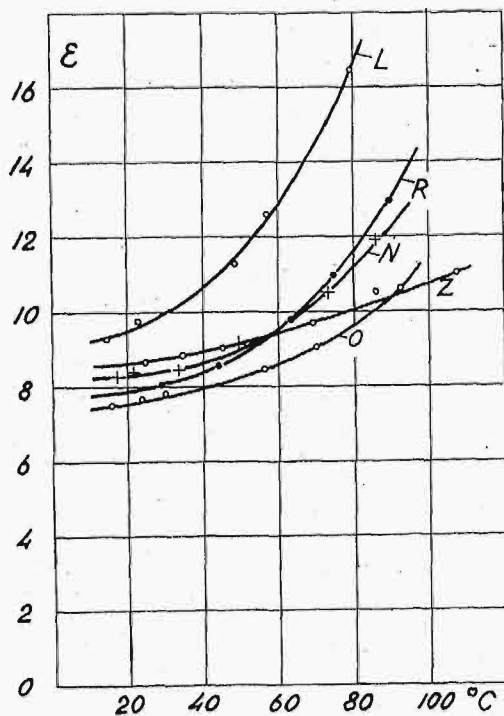


wnętrza próbki, co związane jest z dalszym wzrostem strat i t. d., aż nastąpi równowaga między wytwarzaniem ciepła i wymianą jego z otoczeniem dzięki powstałej różnicy tempe-



Rys. 6.  
Zależność współczynnika strat od temperatury.

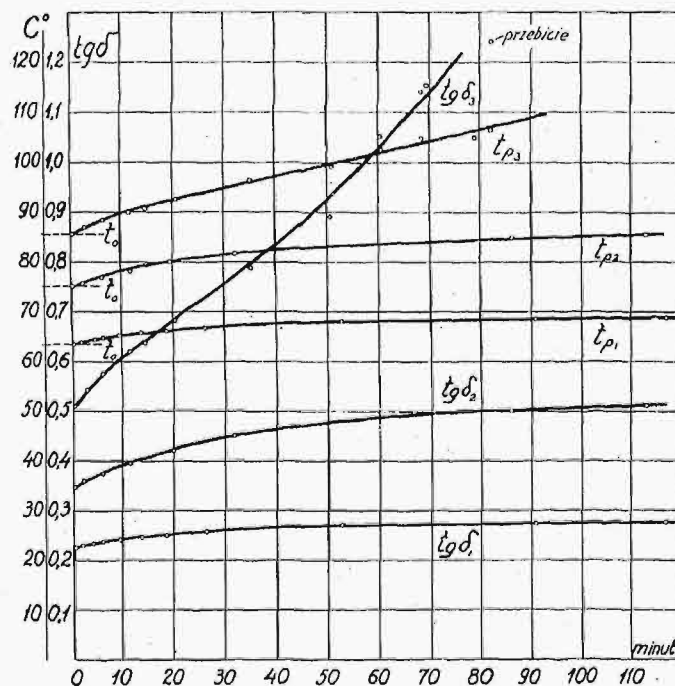
ratur. Otóż, jak widać z rys. 8, dla dużych stratności (wzgl. wyższych temperatur) może taka równowaga wogóle nie nastąpić, dając w rezultacie przebiecie materiału.



Rys. 7.  
Zależność stałej dielektrycznej od temperatury.

Z powyższego wynika cenna wskazówka do projektowania izolatorów: wobec możliwości ogrzewania się izolatorów na słońcu (p. niżej), należy się liczyć z możliwością wzrostu ich temperatury do 60°, a może i wyżej; masa izolatora w tych warunkach musi być w stanie równowagi cieplno-elektrycznej, a kształt izolatora powinien z jednej strony warunkować możliwie małe straty (mała pojemność), a z drugiej — zapewniać łatwe chłodzenie przez otaczające powietrze. Dotyczy to zwłaszcza izolatorów wiszących jednokółpakowych, o stosunkowo większej pojemności i małej grubości dielektryku.

Z wykresów dla zmiennej częstotliwości (Rys. 9 a, b, c) wynika, że przy częstotliwości 50 okr./sek jesteśmy poza maksimum krzywej współczynnika stratności i przy największym pochyleniu krzywej stałej dielektrycznej, które z częstotliwością maleją, a z nimi i współczynnik upływności. Natomiast straty całkowite rosną wraz z częstotliwością i to tem szybciej, im wyższa temperatura próbki<sup>24)</sup>.



Rys. 8.  
Wpływ czasu na straty.  
 $t_0$  — temperatura otoczenia,  $t_p$  — temperatura próbki

### C. Przewodność powierzchniowa.

Przewodzenie powierzchniowe w jednolitych dielektrykach zależy od zanieczyszczeń, znajdujących się na ich powierzchni. W przypadku szkła o powierzchni czystej, przewodzenie to, jak na to zwrócił uwagę jeszcze Kohlrausch<sup>25)</sup>, polega na przewodzeniu warstewki wilgoci, która osiada na powierzchni z otaczającego powietrza, co potwierdzone było przez wielu badaczy (Warburg, Ihmori<sup>26)</sup>, Turner<sup>27)</sup>, Curtis<sup>28)</sup>, Fulda<sup>29)</sup> i in.). Nie wszystkie szkła posiadają jednakową zdolność adsorpcji wilgoci. Ogólnie biorąc, im więcej alkali zawiera szkło, tem adsorpcja jest silniejsza. Kwarc czysty posiada ją w stopniu niewielkim, co więcej, przewodność właściwa tej skroplonej wilgoci, jak obliczono, jest znacznie mniejsza, niż w przy-

<sup>25)</sup> Zeitschr. f. anal. Chem. 1855 r., s. 591.

<sup>26)</sup> Wied. Ann. 27, 1886 r., s. 481.

<sup>27)</sup> Journ. Am. Cer. Soc. 7, 1924 r., s. 313.

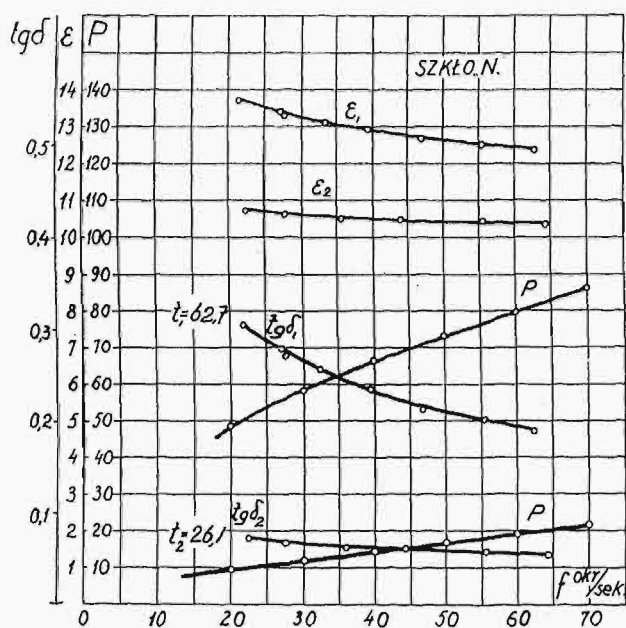
<sup>28)</sup> Sc. Pap. of the Bur. of Stand. Nr. 234, 1914 r., s. 378.

<sup>29)</sup> l. c. (12).

padku szkła. Dzieje się to skutkiem rozpuszczania się składników alkalicznych w wodzie i powstawania dobrze przewodzących elektrolitów. Fulda (l. c.) znalazł, że znacznie zmniejsza tworzenie się warstwy przewodzącej częściowe zastąpienie  $\text{SiO}_2$  przez:  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , przyczem zachodzą *optima* dla pewnych ilości tych składników.

Zjawisko nie kończy się na adsorpcji i powstawaniu warstwy przewodzącej wody, gdyż składniki alkaliczne szkła, krzemiany sodu, a w mniejszym stopniu krzemiany wapnia, hydrolizują, i wskutek tego wiążą wodę na powierzchni szkła, nie dając jej wyschnąć. Tworzy się w ten sposób trwała warstewka przewodząca, trudno dająca się usunąć, gdyż sięga wgłąb szkła, na głębokość kilkunastu warstw cząsteczkowych.

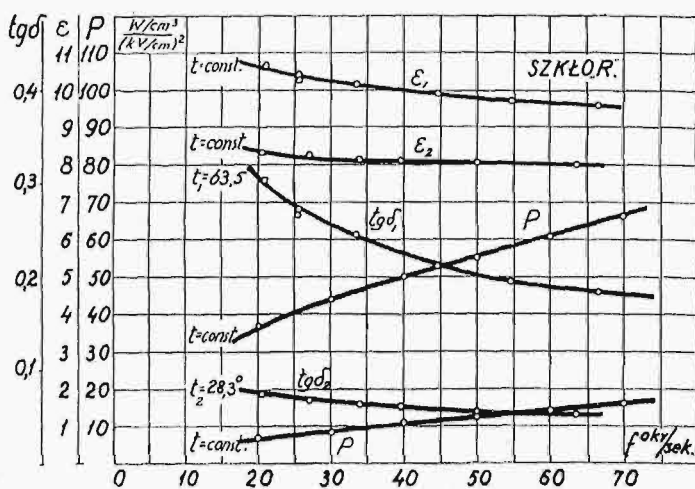
Oczywiście, na przewodność powierzchniową ma wpływ decydujący — poza składem materiału — wilgotność otaczającego powietrza. Po dłuższym przebywaniu w atmosferze o określonej stałej wilgotności i temperaturze



Rys. 9a.  
Wpływ częstotliwości na  $\text{tg } \delta$ ,  $\epsilon$  i  $P$ .

rze następuje stan równowagi lub nasycenia: powierzchnia już nie przyjmuje ani oddaje wilgoci w powietrze. Równowaga ta następuje nieraz dopiero po dłuższym czasie — rzędu dni, a nawet tygodni (por. Curtis, l. c.<sup>28)</sup>). Nie jest więc interesująca z punktu widzenia technicznego wartość absolutna oporności powierzchniowej, wobec ciągłych zmian temperatury i wilgotności otaczającego powietrza. Nie byłoby celowe powtarzanie pomiarów Curtisa lub Fuldy, gdyż interesowałoby nas raczej, czy istnieje związek pomiędzy opornością powierzchniową i skrośną, oraz jak się różne szkła zachowują przy zmianach wilgotności.

Na innym miejscu zwróciliśmy uwagę<sup>30)</sup>, że izolatory o większej przewodności skrośnej, mają jednocześnie większą przewodność powierzchniową, a poza tym są bardziej wrażliwe na zmiany wilgotności: przy wzroście wilgotności względnej oporność ich obniża się szybciej, a ze wzrostem — wolniej rośnie. Spostrzeże-

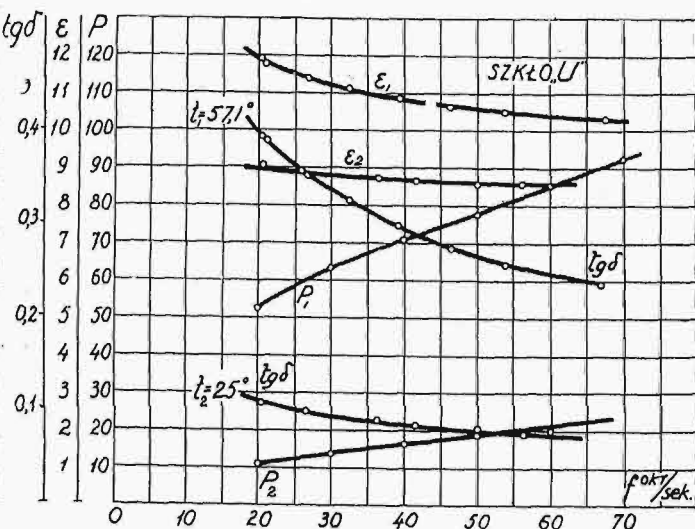


Rys. 9b.

nia te potwierdziły się przy pomiarach na próbkach badanych szkieł.

Należy przedewszystkiem zauważyć, że pomiary tego rodzaju obarczone są znaczną przypadkowością. Zwłaszcza przy większych wilgotnościach (ponad 60 — 70%) w czasie jednego i tego samego pomiaru uzyskuje się duże różnice w spostrzeżeniach. Dlatego też trudne jest stosowanie metod zerowych, co by np. mogło być pożądane do pomiarów upływności przy prądzie zmiennym metodą mostkową. Jak wiadomo, upływność powierzchniowa przy prądzie zmiennym jest większa, niż przy stałym, wskutek częściowo pojemnościowego przepływu prądu po powierzchni dielektryku, jednak ze względów powyższych do badań wybrana została metoda odchyłowa i prąd stały.

Próbki do badania wzięte były te same, co do badań poprzednich tylko zostały obcięte w celu umożliwienia założenia elektrod pomiarowych, a denka zostały zeszlifowane dla uzyskania świeżej i zupełnie gładkiej powierzchni. Probki przed pomiarami były myte wodą z mydłem, alkoholem, znowu wodą, starannie wycierane ręcznikiem i suszone. Elektrod użyto podobnych do stosowanych przez Curtisa, tylko ulepszenie stanowiły podkładki z grubej gumy, pozwalające dokładnie docisnąć cynfolję, stanowiącą właściwą elektrodę (rys. 10). Dociskano elektrody z taką siłą, aby wskazania galwanometru już się nie zmieniały, co ma miejsce przy słabym docięnięciu ze względu na wpływ opor-

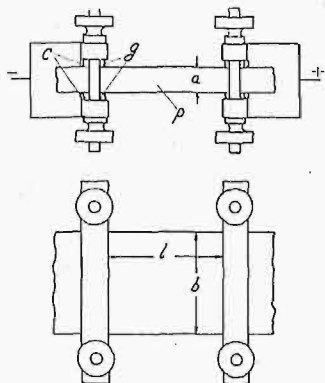


Rys. 9c.

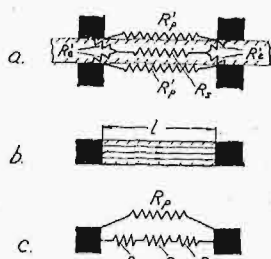
<sup>30)</sup> Przegl. El. Nr. 9, 1934 r., str. 296.



ności przejścia. Przyrządy pomiarowe były używane jak w części A. Próbkę umieszczano w termohigroscie o wymiarach  $60 \times 60 \times 80$  cm, zaopatrzonym w mieszkadło (wentylator) i ebonitowy izolator przepustowy wysokiego napięcia, o budowie przystosowanej do pracy w atmosferze wilgotnej. Pomiar wilgotności odbywał się przy pomocy psychrometru, ze względu na zawodne działanie posiadanych higrometrów i higrografu włosowego.



Rys. 10.  
Elektrody do pomiaru oporności  
powierzchniowej.  
p — próbka badana; g — guma;  
c — cynfolja.



Rys. 11.

Przy pomiarach tych nie mierzy się, oczywiście, czystej przewodności powierzchniowej, lecz sumę przewodności skrośnej i powierzchniowej; komplikuje przytem jeszcze zjawisko oporności przejścia z elektrod do materiału (rys. 11a). Dla pewnych układów elektrod stosunek oporności powierzchniowej do oporności mierzonej (całkowitej) został wyprowadzony z uwzględnieniem rozptywu prądu wewnątrz dielektryku<sup>31)</sup>. Wzory te jednak tu się nie nadają, spróbujemy zatem wprowadzić pewne uproszczenia (rys. 11 b i c), gdzie zakładamy rozptyw prądu jednostajny wewnątrz dielektryku. Przy układzie według rysunku 11 c przewodność całkowita wyrazi się jako

$$G = \frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_s + R_e}.$$

Przy stałych wymiarach poprzecznych płytki, oporność powierzchniowa i skrośna (przy równomiernym rozptywie prądu według rys. 11 b) jest proporcjonalna do odstępów elektrod  $l$ :

$$R_p = \zeta \frac{l}{2b}, \quad R_s = \rho \frac{l}{ab},$$

natomiast oporność przejścia elektrod  $R_e$  pozostaje stała. Wobec tego prosta proporcjonalność  $R_c$  i  $l$  może zachodzić tylko w przypadku  $R_e = 0$ . Wykresy na rys. 12 i 13 przedstawiają wyniki pomiarów dla dwóch próbek. Wynika z nich, że w granicach błędów pomiarów można założyć rozptyw prądu wewnątrz próbki jednostajny oraz oporność przejścia  $R_e = 0$ .

Wobec tego oporność powierzchniowa wyrazi się jako

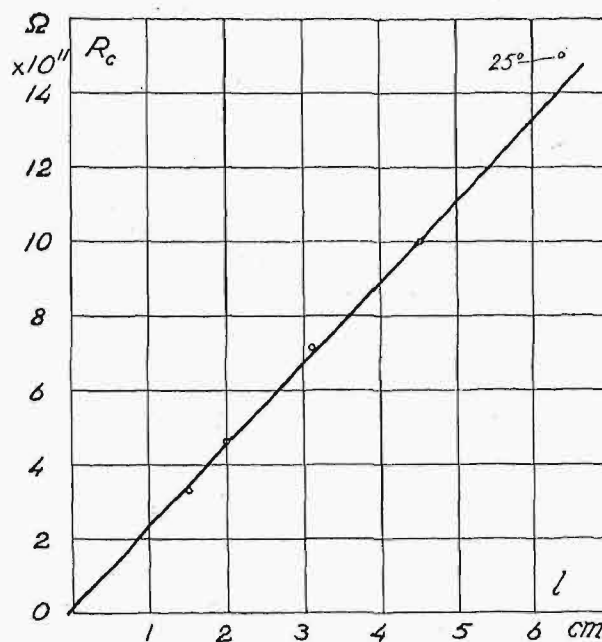
$$R_p = \frac{R_c \cdot R_s}{R_s - R_c},$$

gdzie  $R_c$  jest opornością pomierzoną, a  $R_s$  znajdziemy z wymiarów czynnych próbki, znając oporność właściwą próbki w danej temperaturze. Wreszcie z wymiarów powierzchni upływu możemy obliczyć oporność powierzchniową właściwą ( $\Omega$  cm/cm).

Pomiary wykazały przedewszystkiem, że przy wilgotnościach poniżej 50% przewodność powierzchniowa ma

<sup>31)</sup> Schering, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, str. 45.

znaczenie znikome, a poniżej 30% wilgotności względnej — wogóle nie daje się tą metodą ocenić, gdyż różnica oporności skrośnej (obliczonej) i całkowitej (mierzonej) jest rzędu tego samego lub nawet mniejszego od błędu systematycznego (przeważnie ze względu na uchyb pomiaru temperatury). Dotyczy to zarówno szkła dobrych, o dużej oporności właściwej, jak i złych. Powyżej  $50 \div 60\%$  różnice pomiędzy zdolnością adsorpcji różnych szkła zaczynają się uwidocznić.

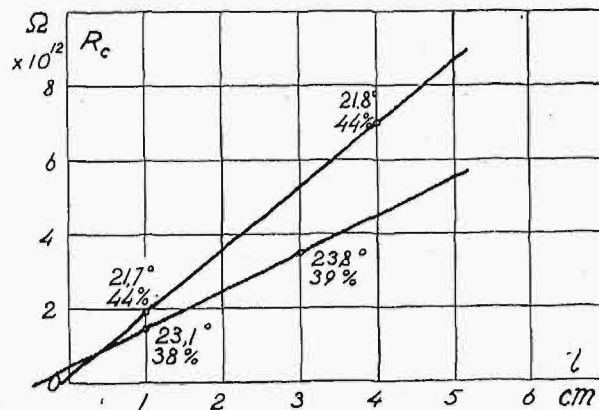


Rys. 12.  
Oporność całkowita w funkcji odległości dla próbki L przy wilgotności ok. 30% i temp. 25,7°C.

Tak na przykład, oporność powierzchniowa właściwa przy ok. 50% wilg. wzgl. jest rzędu:

- dla szkła „L” —  $10^{12} \Omega$  cm/cm,
- „ „ „N” —  $10^{13}$  „
- „ „ „J” — nie daje się zmierzyć.

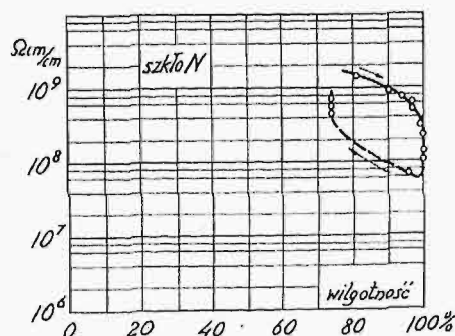
Przy wilgotności około 80% i powyżej oporność skrośna, może już być przyjęta jako nieskończenie wielka wobec



Rys. 13.  
Jak 12, dla próbki N dla dwóch wilgotności i temperatur.

powierzchniowej i pominięta w obliczeniu. Przy dalszym zwiększeniu się wilgotności oczywiście oporność spada coraz szybciej (p. rys. 14), i staje się — po pewnym czasie przebywania w wilgotności stuprocentowej — bardzo mała dla wszystkich rodzajów szkła.

Musimy tu jednak zwrócić uwagę na jeszcze jeden czynnik, a mianowicie czas, w jakim następują te przebiegi. Rys. 14 przedstawia zmianę oporności całkowitej przy stałej temperaturze i zmianie wilgotności w górę i w dół; widzimy tu zjawisko niejako histerezy, zupełnie zresztą zrozumiałe. Otóż dla szkła o wyższych opornościach właściwych przebieg takiej pętlicy nie tylko leży wyżej, ale jest szczuplejszy; tak na przykład dla próbki szkła „O” przy

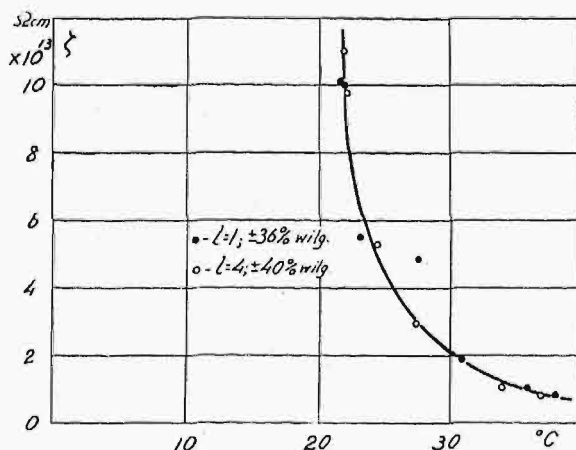


Rys. 14.

Zmienność oporności powierzchniowej z wilgotnością powietrza, przy stałej temperaturze.

szybkiej zmianie wilgotności z 87% na 58% (przez otwarcie higrostatu) oporność wzrosła 10<sup>4</sup>-krotnie w przeciągu jednej minuty, dla „N” przebieg podobny był wolniejszy. Byłoby interesujące ujęcie takich przebiegów w wykresie — o trzech współrzędnych — jednak samo przeprowadzenie tych pomiarów w sposób zupełnie identyczny dla wszystkich próbek jest praktycznie niewykonalne; najtrudniejsze i najważniejsze jest utrzymywanie stałej temperatury próbki i powietrza, gdyż znikome jej różnice pomiędzy szkłem a powietrzem powodują wymianę wilgoci i zupełną zmianę wyników.

Istnienie związku pomiędzy przewodnością skrośną szkła i jego przewodnością powierzchniową stanie się bardziej oczywiste, skoro zwrócimy uwagę, że wszelkie jony posiadają zdolność przyciągania i zagęszczania cząstek pary wodnej. Ponieważ szkło lepiej przewodzące posiada więcej jonów, więcej też ich będzie się znajdowało przy samej powierzchni i więcej cząstek pary wodnej zostanie przyciągniętych.



Rys. 15.

Wpływ temperatury na oporność powierzchniową przy stałej wilgotności.

W związku z tem tłumaczeniem należałoby przypuszczać, że w stanie silniejszej dysocjacji, t. j. przy wyższej

temperaturze, powinna nastąpić i większa adsorbcja. Dotychczas — ze względu na szybki spadek oporności właściwej z temperaturą i trudności pomiarowe z tem związane — zjawisko to nie było zaobserwowane i uważano, że oporność powierzchniowa od temperatury nie zależy (przy stałej wilgotności<sup>32</sup>). Wyniki pomiarów, przedstawione na rys. 15, zdają się jednak stwierdzać słuszność naszego wniosku. Pomiary przeprowadzone były na próbce masy „N” przy różnych odstępach. Pomiary wykonywane były przy bardzo powolnym podnoszeniu temperatury, poczem, po ostudzeniu higrostatu, ponawiane. Wilgotność regulowana była przy pomocy zwilżonego chlorku wapnia.

Rozważaliśmy tu zjawiska, zachodzące na szkło czystym. Jest oczywiste, że izolatory po zabrudzeniu są jeszcze wrażliwsze na wilgoć i mają gorsze własności izolacyjne. Osiedlanie zanieczyszczeń zależy od stanu gładkości powierzchni, ale do pewnego stopnia i od masy szklanej. Sprawą tą zajmujemy się w rozdziale III.

#### D. Wytrzymałość na przebicie.

Wytrzymałość dielektryczna jest podstawową własnością materiału izolacyjnego w technice wysokich napięć i przy projektowaniu izolatorów poświęca się jej odpowiednią uwagę. Nie jest przypadkiem, że szkło od najpierwszych prac nad wytrzymałością dielektryków przyciągało uwagę badaczy i badań tych istnieje ogromna ilość, poczynając od cytowanych prac Mościckiego do czasów najnowszych. Dzieje się to nie tylko ze względu na wielką jego *wytrzymałość*, ale przede wszystkim na wyjątkową *jednolitość*, oraz *przezroczystość*, pozwalającą zawsze spostrzec przypadkową wadę przedmiotu badanego. Trzy te własności są również największymi zaletami szkła, jako materiału na izolatory wysokiego napięcia. Większość prób przy wyrobie izolatorów ceramicznych ma na celu wyłowienie sztuk, posiadających niedostrzegalne zzewnątrz uchybienia masy (próba pospołowa, wielką częstotliwością, udarowa, mechaniczno-elektryczna), podczas gdy przy izolatorach szklanych wystarczają staranne oględziny. I nie przebicie elektryczne jest powodem uszkodzeń izolatorów linjowych szklanych — podobnie zresztą, jak i dobrych ceramicznych, lecz inne zjawiska, które również mogą doprowadzić do zwarcia przewodu z okuciem, jak na przykład: pęknięcia skutkiem naprężeń wewnętrznych lub zewnętrznych (uderzenia, lub rozsadzanie przez kł, albo wadliwe zamocowanie na podporze), przeskoki na izolatorze, prowadzące do zwarć uporczywych, silne upływy skutkiem utworzenia się przewodzących osadów i t. d.

Ze względów wspomnianych nieco wyżej nie mają większego praktycznego znaczenia dla budowy izolatorów ani ściśle wartości wytrzymałości dielektrycznej materiału, ani teorie samego zjawiska przebicia. Izolator stanowi układ, dosyć złożony elektrycznie, w którym zarówno trudne jest obliczenie rzeczywistego naprężenia dielektryku, jak i uwzględnienie wszystkich czynników ubocznych, zniekształcających zjawisko. To samo dotyczy prób wytrzymałości elektrycznej izolatorów szklanych, które są jeszcze bardziej wrażliwe od np. porcelanowych na wyładowania krawędziowe. Słusznie też zauważył T. Nishi<sup>33</sup>), że wytrzymałość izolatora znacznie więcej zależy od sposobu wykonania próby, niż od samego izolatora. Dlatego np. należy uznać za bezwzględnie niewskazaną próbę wytrzymałości izolatorów w oleju izolacyjnym, gdyż daje ona wyniki zupełnie mylne,

<sup>32</sup>) Schering, o. c. str. 41 (K. W. Wagner).

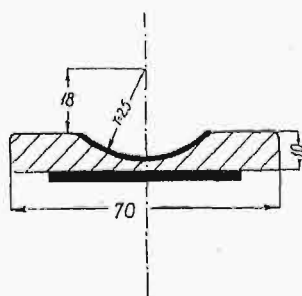
<sup>33</sup>) Conf. Gr. R. El. 1929, 51.

o wiele za niskie wskutek wyładowań krawędziowych pod olejem i zjawisk im towarzyszących<sup>34)</sup>.

Wytrzymałość dielektryczna szkła zależy oczywiście od jego składu. Zwłaszcza przebicie cieplne przy naprężeniu długotrwałym zależne jest od innych własności — przede wszystkim od strat dielektrycznych a więc i od przewodności skośnej, na co już wyżej wskazywaliśmy. Tak więc bezwzględnie należy się spodziewać mniejszej wytrzymałości szkieł o większej przewodności właściwej. Wyniki takie uzyskał I. Mościcki (l. c. 1), a mianowicie szkło alkaliczne (a więc o większej przewodności) dawało niższe o dwadzieścia kilka procent wyniki od szkła twardego (jenajskiego). Wyniki G. Gehlhoffa<sup>35)</sup> wykazywały wpływ poszczególnych składników na wytrzymałość, przyczem co do charakteru wpływ ten naogół pokrywa się z wpływem na oporność, t. j. składniki, obniżające oporność ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), obniżają też wytrzymałość i odwrotnie.

Ze względu na charakter przewodzenia i wzrost przewodności z temperaturą, wytrzymałość szkła maleje, jak i w innych podobnych dielektrykach, w których ilość jonów i ich ruchliwość rośnie z temperaturą, w odróżnieniu np. od takich, jak: воск, siarka, parafina, źle przewodzących i w stanie płynnym.

Dla uzyskania wartości orientacyjnej wytrzymałości szkieł badanych wykonane zostały próbki z kilku mas („N”, „L”, „R”, „U”, „W”, „J”) o kształcie, wskazanym na rys. 16. Promień zaokrąglenia był tak dobrany, aby przy obliczeniu



Rys. 16.  
Kształt próbek do pomiaru wytrzymałości.

naprężenia można było pominąć zniekształcenie pola, spowodowane krzywizną. Dolna elektroda była metalowa, górna — z masy dobrze przewodzącej (grafit i glejta z gliceryną). Całość zanurzona była w oleju izolacyjnym. Pomiary wykonano prądem sinusoidalnym 50 okr./sek. I tu okazało się tak silne działanie wyładowań krawędziowych — pomimo zaokrąglenia —, że dla szeregu próbek uzyskano przebicie na brzegu zagłębienia, t. j. na grubości 1 cm przy napięciu ok. 60 kV skut., po licznych przeskokach naokoło próbki. Okazało się niemożliwe przebicie próbek nawet z gorszego szkła („U”), przy grubości 2,9 do 3,4 mm i przy naprężeniach powyżej 200 kV/cm. Natomiast zastosowanie *elektrody punktowej* wewnątrz zagłębienia dawało przebicia obok elektrody (przy naprężeniu nieco powyżej 100 kV/cm. Po zeszlifowaniu do grubości ok. 0,8 w najcięższym miejscu próbki dawały się przebić przy naprężeniach ok. 880 kV/cm wart. skut.<sup>36)</sup>.

Naprężanie na przebicie izolatora linowego, o ile zachodzi w praktyce, posiada zupełnie inny charakter, a mianowicie *udarowy*, falą przepięciową. I na ten rodzaj naprężeń szkło okazuje się odporniejsze od innych materiałów, dzięki swej jednolitości.

Próby, przeprowadzone na izolatorach 15 kV (rys. 21), wykonanych z masy typu „N”, stwierdziły, że izolatory te o udarowym napięciu przeskoku ok. 200 kV max. wytrzymały po kilkadziesiąt przeskoku (jeden ok. 50) taką samą falą o amplitudzie 300 kV max. — bez przebicia; podobnie typ 6 kV wytrzymał powyżej 160 kV max. — bez przebicia.

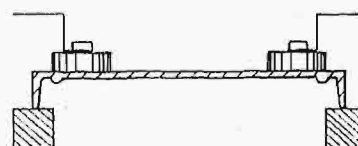
### E. Wytrzymałość na przeskok.

Na zjawisko wyładowań powierzchniowych na dielektryku w powietrzu mają wpływ, jak wiadomo — poza kształtem i właściwościami pola elektrycznego — przede wszystkim stan powierzchni i stała dielektryczna materiału. Stan powierzchni odgrywa podobną rolę, jak przy przewodzeniu powierzchniowym, t. j. zanieczyszczenia, przede wszystkim zaś wilgoć, obniżają napięcie wyładowań ślizgowych. Stała dielektryczna, a raczej różnica pomiędzy stałymi obu ośrodków, wpływa również na obniżenie wytrzymałości materiału na przeskok. Dążyć wobec tego należy do uzyskania stałej dielektrycznej szkła możliwie małej. Chociaż naogół im szkło ma mniejszą przewodność, tem ma też mniejszą stałą dielektryczną (por. tabl. III), jednak nawet najniższe wartości stałej dielektrycznej szkieł są jeszcze b. duże w stosunku do innych materiałów, np. bakelitu. Rady na to, niestety, znaleźć nie można, ale można to uwzględnić przy projektowaniu izolatora.

Wpływ wilgotności powietrza — zupełnie podobnie jak przy oporności powierzchniowej — da się ująć tylko orientacyjnie, jakościowo. Wszelkie liczby, nawet będące wynikiem ścisłych pomiarów, w warunkach praktyki mają znaczenie b. względne. Takie bowiem przedmioty, jak izolatory, znajdując się w otoczeniu powietrza ruchomego, wciąż zmieniają stan swej powierzchni, czy to przez wymianę wilgoci z powietrzem (np. wskutek wahań temperatury), czy też — co ma znaczenie większe — przez zanieczyszczenia, osady, kurz i t. d. Ocena z tego punktu widzenia może więc być tylko przybliżona, — zwłaszcza dla materiałów podobnych co do składu.

W celu porównania własności różnych z pośród szkieł badanych przy wyładowaniach ślizgowych, przeprowadzono serię pomiarów na próbkach, używanych do pomiaru oporności powierzchniowej (o powierzchni zeszlifowanej). Pomiary przeprowadzono w termohigrostatcie, jak przy tamtych pomiarach, przy użyciu transformatora 220/50 000 V, 5 kVA, z regulatorem indukcyjnym. Pomiary polegały na określeniu napięcia przeskoku pomiędzy elektrodami płytkowymi (rys. 17) dla kilku stałych odstępów w warunkach następujących:

- a) przy temperaturze otoczenia i małej wilgotności;
- b) przy temperaturze otoczenia i dużej wilgotności;
- c) przy podwyższonej temperaturze i małej wilgotności;
- d) przy wstawieniu próbki chłodniejszej o parę stopni do higrostatu z atmosferą nasyconą parą wodną (100%) przy temperaturze pokojowej;
- e) przy wstawieniu próbki chłodniejszej o parę stopni do higrostatu z atmosferą o wyższej temperaturze i wilgotności tak, aby w otoczeniu próbki wilgotność wzrosła prawie do 100%.



Rys. 17.  
Układ elektrod do badania wyładowań powierzchniowych.

Próbki przed badaniem były starannie umyte i umieszczone były przez parę dni w higrostatcie w wilgotności względnej ok. 40%. W czasie pomiarów w higrostatcie stale czynny był wentylator. Dla każdego punktu pomiaru powtarzano co najmniej 5 razy, przy większych przypadkowych rozсіewach — więcej (do 10 razy). Kolejne spostrzeżenia dla jednego punktu odbywały się nie częściej, niż co minutę. Szybkość podnoszenia napięcia była tak dobierana, aby przeskoku nastąpił po ok. pół minucie. Pomiary dla jednego

<sup>34)</sup> Van Cauvenbergh, Conf. Gr. R. E. 1931, 1.

<sup>35)</sup> H. Thiene, o. c. str. 347.

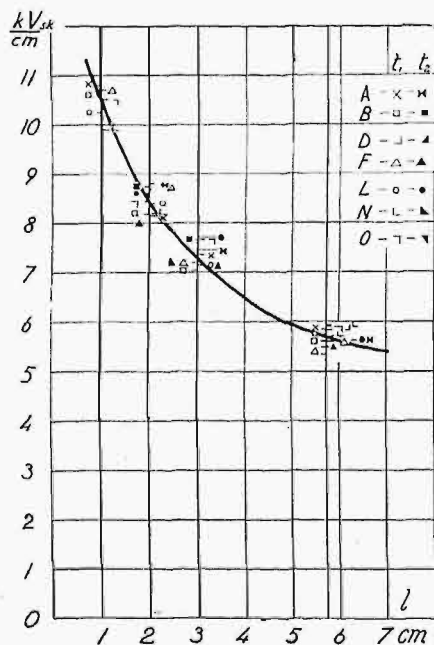
<sup>36)</sup> Pomiary te wykonał inż. K. Kolbiński.



odstępu (3 cm) były powtarzane dla kontroli na poszczególnych próbkach kilkakrotnie, na zmianę.

Pomiary tego rodzaju, pomijając nawet wpływy systematyczne, jak: moc zwarcia układu probierczego, sposób podnoszenia napięcia i in., posiadają zawsze b. duży rozrzut przypadkowy, wynoszący w naszym przypadku do  $\pm 8\%$ . Dla małych odległości dochodzi jeszcze uchyb ze względu na pomiar odstępu elektrod; niestety, wymiary próbek nie pozwoliły na przedłużenie charakterystyki ponad ok. 6 cm.

Z pomiarów dla siedmiu różnych mas przy wilgotności 42% i temperaturze 22° C (p. rys. 18) wynika, że niema wy-



Rys. 18.  
Charakterystyka wyładowań ślizgowych.  
 $t_1 = 21.4^\circ \div 22.5^\circ$ , wilg. 42%  
 $t_2 = 55^\circ \div 58^\circ$ , wilg. 58%

rażnej różnicy pomiędzy badanymi rodzajami mas. Można się było spodziewać, że szkła gorsze „L” i „B”, o większej stałej dielektrycznej, posiadać będą wyraźnie niższe napięcie przeskoku. Tymczasem różnice te, o ile nawet występują dla niektórych punktów, są tak nieznaczne (parę procent), że obejmowane są rozpiętością rozsiewu spostrzeżeń. Być może, że wywiera tu wpływ przeciwny przewodność skrośna, warunkująca równomierniejszy rozkład potencjałów wzdłuż próbki, a skutkiem tego opóźnienie przeskoku. W każdym bądź razie, w warunkach technicznych można już przyjąć, że dla różnych szkła w atmosferze suchej naprężenia przeskoku są jednakowe.

Przy temperaturze podwyższonej należałoby się również spodziewać obniżenia wytrzymałości na przeskok, a to wskutek zmniejszenia wytrzymałości powietrza i wzrostu stałej dielektrycznej. Jednak szereg pomiarów przy temperaturze 58° C i wilgotności ok. 55% zdaje się stwierdzać, że tak nie jest. Różnica już tylko ze względu na zmniejszenie gęstości względnej powietrza powinien wynieść 7,5%, a więc wielkość nawet przy takich pomiarach już możliwą do wyraźnego stwierdzenia; tymczasem przeciętny rozsiew nie przekracza tej granicy. Sprawa ta wymagałaby jeszcze wyjaśnienia.

W większych wilgotnościach różnice pomiędzy różnymi szklami występują wyraźnie. Zdolność do adsorpcji powoduje szybsze i w większej ilości osiadanie wilgoci na po-

wierzchni szkła łatwiej rozpuszczalnych i zjawiska wyładowań powierzchniowych są wyraźnie silniejsze, nawet przy obserwacji bezpośredniej dla szkła gorszych („B”, „L”), niż dla lepszych („J”, „F”, a zwłaszcza dla „O”, borowego).

Przy wstawieniu próbek zimniejszych o 6° C do atmosfery, nasyconej wilgocią (100%), wszystkie próbki natychmiast pokrywają się rosą i napięcie przeskoku — określone dla 3 cm odstępu — w przeciągu pierwszej minuty znacznie spada, ale więcej dla próbek typu „L” i „B” (o 45% i więcej), niż dla szkła lepszych (ok. 30%). Po dłuższym przebywaniu w nasyconej wilgoci przestrzeni, przy skropleniu większych ilości wody na powierzchni, następuje oczywiście prawie że zwarcie, bez względu na jakość szkła, jak wogóle zresztą na każdym materiale.

Jakość materiału pomaga tu tylko do pewnego stopnia, resztę należy uzyskać przez odpowiedni kształt izolatora.

Obniżenie napięcia przeskoku na izolatorach spowodowane bywa w najsilniejszym stopniu przez osady przewodzące (w pobliżu fabryk chemicznych, morza), a nawet — choć w mniejszym stopniu — przez osad zwykłego kurzu<sup>37)</sup><sup>38)</sup>. Osady te łatwiej przystają do takich powierzchni, które z natury są nierówne, albo stały się szorstkie pod wpływem wietrzenia, a również do powierzchni, które mają zdolność tworzenia dzięki adsorpcji warstewki wilgoci na sobie. Do takich właśnie należą szkła łatwiej rozpuszczalne. Oceną tej własności zajmujemy się niżej.

### III. ODPORNOŚĆ NA STARZENIE.

Niezdadność izolatorów szklanych do pracy z biegiem czasu może być spowodowana (z pominięciem czynników przypadkowych) przez pękanie izolatorów lub utracenie przez powierzchnię początkowej gładkości wskutek zwiertzenia lub przylegania trwałych osadów przewodzących. Pomijamy tu jeszcze jedno źródło starzenia się mas szklanych wogóle, a mianowicie: dewitryfikację, ponieważ w temperaturach, w jakich pracują izolatory, zarówno szybkość krystalizacji, jak i szybkość powstawania ośrodków krystalizacji są znikome. Przy pewnych składach mas szklanych mogłyby raczej istnieć obawy dewitryfikacji w czasie wyrzutu, ale temi kwestiami zajmować się tu nie możemy.

Pękanie szkła bez widocznego powodu lub pod wpływem niewielkich zmian temperatury spowodowane bywa istnieniem naprężeń wewnętrznych, zbliżonych do granicy wytrzymałości masy lub powodujących zmęczenie materiału. Wtedy nieznaczna nawet różnica temperatury, uderzenie, skałeczenie i t. d. — powoduje pęknięcie. Naprężenia te powstają — w przypadku szkła prasowanego, z jakim mamy do czynienia — albo skutkiem niedostatecznego wypalenia izolatorów, t. j. nieosiągnięcia temperatury początku plastyczności, przy której znikają naprężenia, lub też skutkiem zbyt szybkiego stygnięcia, przy którym powstają duże spadki temperatury wewnątrz masy i części izolatora niejednocześnie przechodzą w stan sprężysty. Powstawaniu naprężeń wewnętrznych w tym ostatnim przypadku sprzyjają: z jednej strony nieodpowiedni kształt izolatora (znaczne różnice i nagłe zmiany przekroju, ostre krawędzie i wręby i t. d.), z drugiej strony — duży współczynnik rozszerzalności cieplnej i mała przewodność cieplna. Oba te względy wiążą się z odpornością cieplną.

Chociaż skłonność do powstawania naprężeń wewnętrznych zależy również, jak z tego wynika, od składu masy, jednak ze względów odbiorczych możemy się tą kwestią

<sup>37)</sup> H. Becholdt, Untersuchung v. Isolatoren bei starker Verschmutzung. Ker. Rund. 1928 r., 241.

<sup>38)</sup> M. Van Cauwenbergh, Isolateurs souillés, Conf. G. R. E. 1931.



nie zajmować, gdyż istnieje prosta metoda stwierdzania naprężeń wewnętrznych w szkłe (bez względu na ich pochodzenie), która pozwala zawsze wyeliminować sztuki wadliwe, któreby mogły ulegać pęknięciu przy pracy. Polega ona na własności szkła skręcania płaszczyzny polaryzacji światła w zależności od wielkości naprężenia; stosuje się ją powszechnie w większych hutach (zagranicznych i krajowych) do selekcji wyrobu. Pozostaloby tylko, po rozważeniu innych własności szkła, sprawdzić, czy szkła dobre pod innymi względami nie mają silnej tendencji do tworzenia naprężeń wewnętrznych. Zajmiemy się więc tutaj tylko starzeniem powierzchni izolatorów, t. j. skłonnością do wietrzenia pod wpływem czynników atmosferycznych. Skłonność ta, jak wykazaliśmy na innym miejscu<sup>39)</sup>, jest związana ze skłonnością do tworzenia osadów stałych na powierzchni izolatorów napowietrznych.

Wietrzenie powierzchni szkła polega w istocie na działaniu wody i kwasu węglowego na masę szklaną<sup>39)</sup>. Skutkiem adsorpcji wilgoci przez powierzchnię następować może dyfuzja wody do wnętrza oraz tworzenie się roztworów wodnych, ze składnikami łatwiej rozpuszczalnymi; z produktów tych powstaje na powierzchni błonka (n. b. dobrze przewodząca), w dalszym ciągu pochłaniająca wilgoć z atmosfery. W rezultacie tworzą się sole rozpuszczalne, przeważnie alkaliczne węglany i wodorotlenki, które z powierzchni mogą być ewentualnie częściowo spłukane, np. przez deszcz, pozostawiając szkielet z mniej rozpuszczalnych składników (przedewszystkiem krzemionki)<sup>40)</sup>.

Ze względów elektrycznych najważniejsze są dla nas dwa zjawiska: 1) skłonność do adsorpcji wody przez silniej rozpuszczalne szkła, co musi zwiększać przewodność powierzchniową tych szkieł, i 2) większa rozpuszczalność składników alkalicznych, które również, jak wyżej widzieliśmy, dają gorsze własności elektryczne.

Istnieją metody powszechnie znane badania odporności szkła na wietrzenie lub rozpuszczanie się, dotyczą one jednak naogół innych warunków pracy (np. odporność na kwasy), albo posiadają charakter jakościowy (np. badania mikroskopowe, por. <sup>40)</sup>). Próby jodeozyną<sup>41)</sup> nie dały dobrych wyników ze względu na rozmaite — nieraz bardzo ciemne — barwy badanych szkieł, nie pozwalające robić pomiarów kolorymetrycznych. Tu należało wybrać metodę ilościową, odtwarzalną, o czynnikach zbliżonych do pracy normalnej szkła izolatorowego, a więc wody lub pary wodnej. Wypróbowano kilka metod rozpuszczania szkła, dopóki nie zatrzymano się na ostatniej.

Gotowanie z pewną ilością wody destylowanej daje najwięcej produktów rozpuszczalnych, ale jest niedogodne ze względu na rozdrabnianie się ziarenek szkła, w czasie tarcia o siebie przy wrzuceniu, co prowadzi do rozbieżnych wyników. Spłukiwanie szkła parą wodną, skraplającą się na próbce badanej, daje wyniki podobne. Najdogodniejszą okazała się metoda następująca: 120 cm<sup>3</sup> wody destylowanej podgrzewano na kąpieli olejowej w kolbie Pyrex'owej do temperatury  $87 \pm 2^\circ \text{C}$ , poczem wsypywano próbkę szkła (20 g) i utrzymywano tę samą temperaturę w przeciągu 30 min., lekko mieszając co pewien czas, poczem wodę ściągano lewarem i dopełniano do 100 cm<sup>3</sup>. Z tych dla 50 cm<sup>3</sup> określano po ostudzeniu oporność właściwą (met. techniczną, prądem zmiennym), a drugie 50 cm<sup>3</sup> na gorąco zobojętniano kwasem solnym 1:10 normalnym,

przy użyciu, jako wskaźnika, oranżu metylowego. Ilość HCl 1:10n w centymetrach sześć, niezbędną do zobojętnienia tych 50 cm<sup>3</sup>, po odjęciu określonej uprzednio przez próbę „ślepa” ilości kwasu na zobojętnienie użytej wody przyjęto, jako miarę alkaliczności szkła. Drugim miernikiem była pomierzona oporność wody.

Należy zauważyć, że dużo czynników przypadkowych wpływa na zwiększenie uchybów przy tych pomiarach. Starano się zmniejszyć ich wpływ, wykonywając serię pomiarów jednym ciągiem, z odczynnikami temi samymi, zachowując to samo postępowanie. Aby uzyskać dla każdej próbki możliwie tę samą wielkość powierzchni, szkło do badania rozpuszczalności było tłuczone w moździerzu i siane przez dwa sita o niewielkiej różnicy oczek, mianowicie 0,9 mm i 0,63 mm w świetle; do próby brana była frakcja z drugiego sita, o średnicy przeciętnej ziarenka 0,76 mm. Dla orientacji podajemy wielkość powierzchni całkowitej dla ilości 20 g, używanej do badania. Zakładamy przytem kształt ziarenka nie kulisty, jak to się zwykle czyni, lecz sześcienny, jako bliższy rzeczywistości. Jeżeli  $n$  jest liczbą ziarenek,  $\gamma$  — ciężkością właściwą,  $a$  — bokiem przeciętnego ziarenka, wtedy waga próbki wyrazi się jako

$$G = n a^3 \gamma = 20 \text{ g.}$$

a powierzchnia:

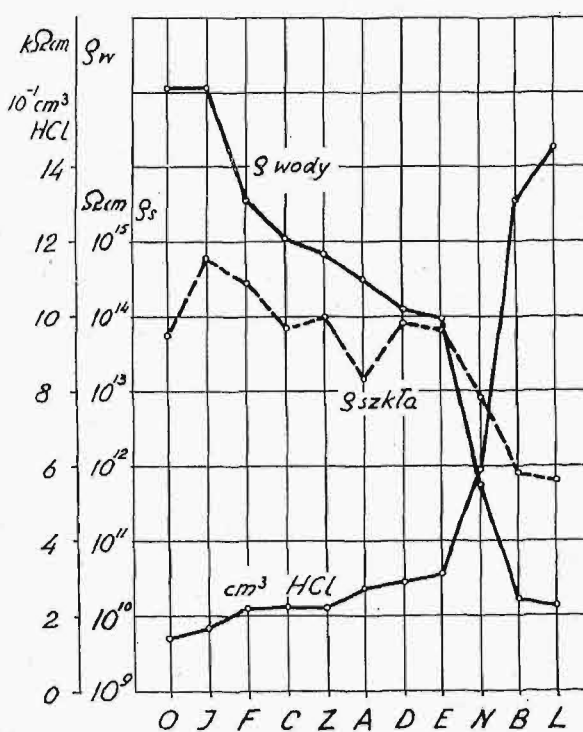
$$S = n 6 a^2,$$

skąd, uwzględniając ciężar właściwy przeciętny dla badanych szkieł  $\gamma = 2,45$ , znajdziemy

$$S = \frac{20 \times 6}{2,45 \times 0,076} \approx 650 \text{ cm}^2.$$

Jest to mniej więcej powierzchnia zewnętrzna kloszy dwóch dużych izolatorów teletechnicznych.

Wyniki dla próbek zbadanych przedstawia rys. 19.



Rys. 19.

Rozpuszczalność i oporność szkła.

Dla porównania podane są jednocześnie i przewodności właściwe odpowiednich mas. Widzimy zasadniczą zgodność pomiędzy przewodnością i rozpuszczalnością szkła: szkła o większej oporności właściwej, bez względu na to, przy pomocy jakiego składu zostało to uzyskane (dodatek

<sup>39)</sup> F. R. V. Bichowsky, J. Am. Ceram. Soc. 1920, vol. 3, s. 310.

<sup>40)</sup> Kozo Tabata, On the weathering of glasses, Tokio, 1926

<sup>41)</sup> Lunge - Berl, Chemisch - Technische Untersuchungsmethoden, t. II.

MgO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> czy Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>}, są jednocześnie trudniej rozpuszczalne, a więc odporniejsze na starzenie się powierzchni i tworzenie się osadów. Z wykresu zatem widzimy również, że obie metody określenia stopnia rozpuszczalności dają wyniki naogół zgodne. W wykresie widoczne są pewne odskoki, które nie dadzą się usprawiedliwić tylko uchybem pomiaru. Tak np. „0” daje najmniejszą wartość alkaliczności, a oporność rozładowania daje jak dla „I”, podczas gdy oporność właściwą ma niższą; dzieje się to skutkiem zawartości B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, gdyż szkła borowe są bardzo mało rozpuszczalne. Podobnie dla „A” (o dużej zawartości krzemionki): szkło to jest trochę mniej rozpuszczalne, niżby to wypadło z jego oporności skrośnej. Natomiast odwrotnie „E”, zawierające MgO i dużo CaO, okazuje lepsze własności elektryczne, ale nieco większą rozpuszczalność dzięki znacznej również zawartości Na<sub>2</sub>O. Jednak odskoki te nie obalają ogólnej zasady: szkła o większej oporności właściwej są mniej rozpuszczalne.

Porównyując rys. 19 z tablicą I, możemy zauważyć, że szkło niekoniecznie musi zawierać dużo krzemionki, aby było odporne na starzenie. Jest to o tyle cenne, że szkło takie, będąc trudno topliwem, daje się trudniej prasować i powierzchnia izolatorów po wyjściu z formy jest nierówna, lekko falista, co nie jest pożądane ze względu na łatwiejsze osiadanie zanieczyszczeń. To samo można powiedzieć o szklach borowych, które, jakkolwiek mają znakomite własności elektryczne i są bardzo słabo rozpuszczalne, jednak również są bardzo twarde i co więcej, mają skłonność do naprężeń wewnętrznych. Izolator z takiego szkła naprężonego, chociaż jest mocniejszy od innych, ale zato nawet przy nieznacznym uszkodzeniu rozpryskuje się na drobne kawałki, co ze szkłem miększym nie zachodzi.

Poza powyższymi pomiarami próbowano naturalnego starzenia izolatorów z mas: „N”, „L”, „J”, „W” i paru niewymienionych, przez wystawienie ich za oknem pracowni od strony południowo-zachodniej; jednak po dwu i pół rocznym pobycie wyraźnych, dostrzegalnych gołym okiem zmian jeszcze nie dostrzeżono, poza tem, że zanieczyszczenia z izolatorów z mas o mniejszej oporności („L” i in.) trochę trudniej się usuwają.

Pozatem próbowano wpływu promieni pozafajolkowych, przez naświetlanie próbek „M”, „L”, „W”, „U”, „R” przez czas 106 godzin lampą kwarcową z odległości ok. 30 cm, przy polewaniu co pewien czas próbek wodą destylowaną. Próba ta wyników dostrzegalnych nie dała.

#### IV. WŁASNOŚCI MECHANICZNE I CIEPLNE.

Dla szkła, jak dla mało jakiego innego materiału, wytrzymałość mechaniczna i cieplna gotowego przedmiotu zależą od kształtu i od postępowania przy wyrobie. Jednak, oczywiście, przy tych samych warunkach jakość masy musi tu odgrywać odpowiednią rolę.

Ze względu na zastosowanie szkła, które nas tu interesuje, należałoby stwierdzić, czy wymagania co do własności poprzednio omawianych nie kolidują z własnościami mechanicznymi i cieplnymi. Co się tyczy wytrzymałości mechanicznej, interesują nas tu przede wszystkim: wytrzymałość na rozierwanie, na zginanie, na uderzenie i współczynnik sprężystości. Wpływ składu szkła ma tu znaczenie ogromne, ale w naszych warunkach, t. j. przy szkle sodowo-wapniowym z dodatkami niewielkiej liczby tlenków, poruszamy się w stosunkowo niewielkich granicach. Naogół dodatki, pożądane ze względów elektrycznych, a więc podnoszące oporność właściwą, jak CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, podnoszą również (w granicach praktycznie zachodzących) i wytrzyma-

łość, lub mają wpływ nieznaczny (MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Tutaj również należy podkreślić, że zbytne zwiększenie zawartości krzemionki kosztem alkali prowadzi do obniżenia wytrzymałości na zginanie i podwyższenia współczynnika sprężystości, co również jest bardzo niepożądane.

Z wytrzymałością wiąże się również kwestja naprężeń wewnętrznych. Są one wogóle niepożądane, jako prowadzące zwykle do zniszczenia izolatora. Jednak w pewnych gatunkach szkła, np. borowych, zwłaszcza Pyrex, celowo są utrzymywane naprężenia (szkło „hartowane”), gdyż wytrzymałość mechaniczna takiego szkła jest wyższa. W ogólności natomiast zjawisko to jest szkodliwe z jednej strony dlatego, że szkło hartowane jednocześnie posiada mniejszą oporność<sup>\*)</sup>, a z drugiej — ze względu na wspomniane wyżej rozpryskiwanie się szkła hartowanego przy uszkodzeniach, co w wypadku izolatorów jest niedopuszczalne.

Odporność cieplna jest najczulszą stroną przedmiotów szklanych. Jednak w przypadku izolatorów napowietrznych warunki pracy dla przeciętnie dobrych szkła, pozbawionych naprężeń wewnętrznych (odhartowanych), nie są groźne. Pomijamy tu oczywiście uporczywe zwanie o dużej mocy na izolatorze, ale materiału odpornego na łuk elektryczny wogóle niema. W warunkach normalnej pracy izolator podlega znacznym rozpiętościom temperatur, ale są one odległe od siebie w czasie, a tylko nagła zmiana temperatury pomiędzy częściami izolatora może być groźna. Najważniejszą więc dążnością przy konstruowaniu izolatora powinno być ułatwienie szybkiej wymiany ciepła pomiędzy jego częściami. Ze względu na masę szklaną sprzyja temu jak największa przewodność cieplna i niewielkie ciepło właściwe; niestety, obie te własności, jak również zmniejszenie współczynnika rozpuszczalności, związane są ze wzrostem zawartości krzemionki kosztem wszystkich innych składników<sup>2)</sup>. Wobec sprawy odporności na zmiany temperatury i wytrzymałości mechanicznej jest związana ze składem w sposób dosyć skomplikowany. Zależność pomiędzy własnościami fizycznymi i odpornością cieplną ujmuje wzór Winkelmana i Schotta jako współczynnik odporności cieplnej:

$$f = \frac{K_r}{E\alpha} \sqrt{\frac{\lambda}{c\gamma}}.$$

Jak widzimy tu, największy wpływ mają K, E i  $\gamma$ , a że przy zmianie stosunku krzemionki i alkali zmiany ich w pewnym stopniu idą w kierunkach przeciwnych, więc niekiedy mogą się kompensować.

Jednym z ważniejszych źródeł powstawania naprężeń cieplnych w izolatorze jest nagrzewanie go przez promienie słoneczne<sup>3)</sup>. Niebezpieczeństwo jest dwojakie: albo nagrzany izolator w razie nadejścia burzy jest gwałtownie ochłodzony, albo na zimny izolator (np. po nocnym przymrozkach) nagle padają promienie słoneczne. Ten ostatni przypadek podobno może być źródłem uszkodzeń w linjach górskich. Badania w Szwajcarii<sup>4)</sup>, przeprowadzone przy temperaturze otoczenia 28°C, wykazały następujące najwyższe przyrosty temperatury, osiągnięte przez izolatory na słońcu:

porcelanowy stojący biały . . . .	14,8°C
„ jasnobronzowy . . . .	22°
„ ciemnobronzowy . . . .	28,7°
szklany zielony . . . . .	26°

Obserwacje, przeprowadzone przez autora w jeden z najśnieźniejszych dni w 1933 i 1934 r., nie dały tak znacznych przyrostów temperatury (wewnątrz max. 16°), zda-

<sup>\*)</sup> Fulda, l. c.

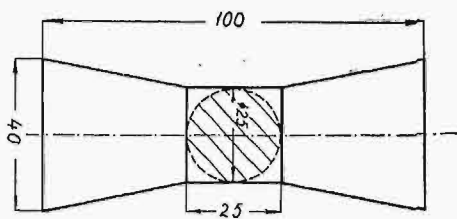
<sup>2)</sup> K. Thiene, o c. str. 110, 112, 154.

<sup>3)</sup> L. Pomerol. Conf. G. R. E., 1922.

<sup>4)</sup> Bull. ASEV, 1928, s. 677.

ją się natomiast wskazywać, że ogromną zaletą szkła jasných, t. zw. półbiałych, jest ogrzewanie się na słońcu szybko i równomierne w całej masie. Natomiast szkło bardzo ciemne, pochłaniające silnie promienie tuż przy powierzchni, rozgrzewa się jednostronnie i przytem znacznie silniej od półbiałego, podobnie zresztą jak porcelana z ciemną polewą. Wnosićby z tego należało, że ciemne zabarwienie szkła, związane przede wszystkim z zawartością tlenków żelaza do 1% i więcej, jest niewskazane. Przy osłonięciu izolatorów od promieni słonecznych stygną one b. szybko, szybciej od porcelanowych, dzięki większej przewodności cieplnej.

Co się tyczy mas badanych, o ile to można wnosić z prób cieplnych na kilkunastu próbkach, kształtu badanego (rys. 1) przy różnicy temperatur 65°C, masy lepsze elektrycznie typu „Z”, „F”, „O”, nietylko nie ustępują innym, ale wytrzymują naogół większą liczbę cykli cieplnych.



Rys. 20.  
Próbka do badania wytrzymałości  $K_r$ .

Poniżej podajemy przeciętne wyniki, uzyskane dla mas typu „N” i zbliżonych do niej. Pomiar wytrzymałości mechanicznej na rozerwanie wykonane były na próbkach wg. rys. 20; wytrzymałości na zginanie, współczynnika sprężystości i uderności — na prętach okrągłych średnicy 15 do 20 mm:

Wytrzymałość na rozerwanie przy przekroju 5 cm <sup>2</sup>	$K_r = 300 \text{ kg/cm}^2$ (minimum)
Wytrzymałość na zginanie przy przekroju 2 cm <sup>2</sup>	$K_g = 650 \text{ kg/cm}^2$
Spółczynnik sprężystości (Uderność*)	$E = 680000 \text{ kg/cm}^2$
Spółczynnik rozszerzalności w granicach -30° do +30° C**) dla masy	5 cmkg/cm <sup>2</sup>
dla masy	„W” $\alpha = 75 \cdot 10^{-7}$
	„U” $\alpha = 96 \cdot 10^{-7}$
Ciężkość właściwa (przeciętna)	$\gamma = 2,45$

Po oszacowaniu przybliżonem przewodności cieplnej i ciepła właściwego przez porównanie z wynikami dla szkła o zbliżonym składzie <sup>43)</sup> otrzymamy  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $c = 0,2$ , co podstawiając do wzoru na współczynnik odporności cieplnej otrzymamy

$$f = \frac{K_r}{E \alpha} \sqrt{\frac{\lambda}{c \gamma}} \approx 3,5,$$

jako wartość przeciętną dla szkła izolatorowych badanych. Odpowiada to naogół przeciętnym niższym wartościom, spotykanym w literaturze. Wynika to przede wszystkim z niskiej wartości  $K_r$ , która zwykle bywa badana na próbkach cieńszych, dających znacznie wyższe wartości.

Sprawę odporności cieplnej i mechanicznej izolatorów — w zastosowaniu do izolatorów niskiego napięcia — omawialiśmy pozatem na innym miejscu <sup>40)</sup>. Uwagi tam zamieszczone, których nie uważamy za potrzebne tu powtarzać, mają w całości zastosowanie i w przypadku izolatorów szklanych wysokiego napięcia.

\*) Pomiar w Inst. Bad. Inż. M. S. Wojsk.

\*\*) Pomiar w Inst. Fizycznym przy Min. Przem. i Rol.

## V. WNIOSKI

Wnioski z całości rozważań poprzednich możemy wyciągnąć następujące:

1. Własności elektryczne szkła, jak: oporność skrośna i powierzchniowa, kąt stratności, stała dielektryczna, wytrzymałość elektryczna na przebicie i na przeskok, a wreszcie i odporność na wpływy atmosferyczne, są związane ze sobą — przynajmniej dla odmian szkła badanych sodowo-wapniowych, — przytem w ten sposób, że ze wzrostem oporności polepszają się wszystkie wymienione własności, własności zaś mechaniczne i cieplne mogą być co najmniej te same.

2. Wobec tego do oceny masy izolatorowej szklanej wystarczy — jako najczulszy i najłatwiejszy — pomiar tylko oporności właściwej skrośnej.

3. Jako materiał odpowiedni do wyrobu izolatorów, zwłaszcza wysokiego napięcia, należy uznać szkło o oporności skrośnej przy 20°C co najmniej  $10^{14} \Omega \text{ cm}$ , które zresztą w zupełności można uzyskać w warunkach krajowej produkcji hutniczej (dotychczas stosowane powszechnie — poniżej  $10^{13} \Omega \text{ cm}$ ).

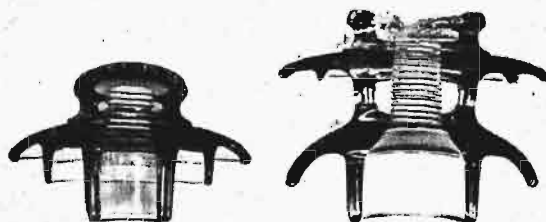
4. Jako wskazówki przy budowie izolatorów szklanych wysokiego napięcia, należy wymienić:

a) pojemność geometryczna powinna być jaknajmniejsza ze względu na duże  $\epsilon$  i  $\tan \delta$ ;

b) kształt powinien ułatwiać wyrównywanie się temperatur i to zarówno przy wyrobie (naprężenia trwałe), jak i przy pracy (naprężenia cieplne);

c) w celu uniknięcia osadów kształt powinien umożliwiać łatwe zmywanie izolatora przez wiatr i deszcz, oraz ułatwiać jego obsychanie;

d) z tych samych względów izolator nie powinien posiadać wnęk ani zakrzywień, powodujących powstawanie dużych stycznych natężeń pola, które zwykle są również powodem tworzenia się osadów.



Rys. 21.  
Izolatory 6 i 15 kV, wykonane wg. projektu autora (przekroje)

Na podstawie powyższych przesłanek zostały przez autora opracowane projekty izolatorów linjowych szklanych (rys. 21), z których typ na 6 kV od półtora roku pracuje — dotychczas bez zarzutu — w jednej z sieci elektrycznych w Polsce.

## ZAKOŃCZENIE.

Praca niniejsza wykonana była w Zakładzie Miernictwa Elektrotechnicznego i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej w latach 1931 — 34. Pobudką do jej rozpoczęcia było dążenie do wprowadzenia w Polsce produkcji izolatorów szklanych wysokiego napięcia. Z prawdziwą przyjemnością składam na tem miejscu wyrazy wdzięczności p. Prof. K. Drewnowskiemu za zachętę do przeprowadzenia zamierzonej pracy i cenne wskazówki oraz p. dr. J. Konarzewskiemu za liczne rady co do strony chemicznej powyższych badań.

Spółce Akc. J. Stolle-Niemen składam również serdeczne podziękowanie za życzliwą współpracę, a pp. inż. K. Kolbińskiemu i inż. C. Szulcowi — za pomoc przez wykonanie niektórych pomiarów.



# DOŚWIADCZALNE OKREŚLENIE SIŁ ZWARCIA W TRANSFORMATORACH

lnż. W. KOPCZYŃSKI

**Streszczenie.** Opisany jest sposób doświadczalnego określenia sił zwarcia w transformatorach o uzwojeniu krążkowym. Wyniki doświadczeń porównywa się z danymi wzorów M. Vidmar'a, P. Benischke'go i R. Richtera. Rozważaniami wskazuje się na możliwość silnych odchyśleń wzoru Benischke'go przy zwojnicach różnych kształtów.

W ZESZYCIE 9-tym „Przegl. Elektrotechn.” na str. 221 podane były teoretyczne wywody oraz wzory na określenie sił mechanicznych, występujących przy zwarciach w transformatorach<sup>\*)</sup>. Znaczne różnice w wartościach, podawanych przez takich autorów, jak prof. M. Vidmar, prof. R. Richter i prof. G. Benischke, szczególnie zaś sprzeczności w ujęciu teoretycznym, nasuwały przypuszczenia, że rozwiązanie drogą teoretyczną napotyka na zbyt wielkie trudności i skłaniały do prób w kierunku doświadczalnego określenia tych sił, przynajmniej dla normalnych typów transformatorów.

Oczywiste jest, że z prób, wykonanych na niewielkiej ilości typów lub — jak w danym wypadku — na jednym transformatorze, nie można wyciągać wniosków ogólnych, tworzyć nowej teorii lub nowych wzorów, lecz można rozważyć stosowność istniejących wzorów dla danego transformatora.

Doświadczenia były robione w sposób możliwie uproszczony: odległości były mierzone miarkami milimetrowymi i to niezbyt dokładnie wobec drgań zmiennego pola magnetycznego, siły były mierzone ciężarkami, a wielkości elektryczne — zwykłymi przyrządami warsztatowymi Westona. Uproszczenie środków pomiarowych — pomimo oczywistych wad — miało tę wielką zaletę, że pozwalało orjentować się w właściwościach zachodzących tu zjawisk.

Pierwsze doświadczenia miały znaczenie raczej orientacyjne i były tylko podstawą do następnych, ściślejszych i dlatego podaje tu wyniki tylko ostatecznych doświadczeń. Doświadczenia były robione tylko w celu wyznaczenia, które z podanych powyżej wzorów najlepiej odpowiadają rzeczywistości. Początkowo szło głównie o stwierdzenie, czy wyniki doświadczeń będą bliższe danym wzorom R. Richtera czy też M. Vidmara i czy możliwe są przy różnych warunkach różnice, dochodzące do 100%. Byłoby już wielkim udogodnieniem, gdyby konstruktor mógł się opierać na danych, wykazujących różnice, powiedzmy, do 20%, gdyż wahania do 100% są już bardzo uciążliwe do ujęcia. Choć mechaniczne konstrukcje są wykonywane z dość wielkim bezpieczeństwem i konstruktorzy liczą się zawsze z pewnymi możliwymi wahaniami w obciążeniach, to jednak w elektrotechnice dąży się do możliwie ścisłego wyznaczania wartości.

Ponieważ poniższe ma być dopełnieniem wywodów teoretycznych, podanych w pracy p. t. „Siły mechaniczne przy zwarciach w transformatorach”, w zesz. 9-tym „Przeglądu Elektrotechnicznego”, na str. 221, więc zachowane będzie to samo znakowanie.

<sup>\*)</sup> Na str. 223 w wierszu 5-tym od dołu w rozwiązaniu wzoru M. Vidmara (23-go) zaszedł błąd: zamiast  $10^{-6}$  w liczniku powinno być  $10^6$ . We wzorze 44-tym zamiast  $F_{ouz} = \frac{P 10^{-6}}{m \delta f e_z}$  powinno być  $F_{ouz} = \frac{0,2 P 10^6}{m \delta f e_z}$ . (44)

We wzor. 21 i 22 w mianowniku zamiast  $I_z$  powinno być  $I_z$ , t. j. napięcie zwarcia.

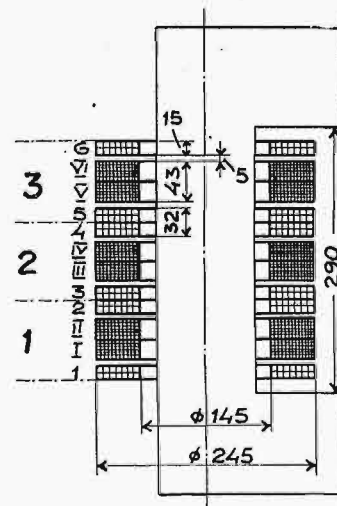
## Siły osiowe w uzwojeniach krążkowych.

Do doświadczeń wzięty był transformator suchy o uzwojeniu krążkowym, wytwórni SSW, typu KP 180, o mocy 30 kVA, o danych znamionowych: moc 30 kVA, napięcie 3000/125 V, prąd 5,96/141,5 A, układ gwiazda — gwiazda (B2). Ilość zwojów  $Z_1 = 720$ , po 120 w zwojnicy,  $Z_2 = 30$ . Transformator posiadał 3 zwojnice pełne (t. j.  $q = 3$ ), lub 6 połówkowych (t. j.  $m = 6$ ). Przy doświadczeniach uzwojenie wtórne (zwarte) było łączone w szereg. Rys. 1 podaje wymiary transformatora oraz uzwojeń. Oporność zwarcia uzwojenia w stanie zimnym wynosiła 4,35 oma, wskutek nagrzewania przy doświadczeniach — 5,0 do 5,4 oma.

Dla określenia sił osiowych, działających na skrajną zwojnicę połówkową, zwojnica została osadzona na rdzeniu możliwie luźno i połączona elastycznym kabelkiem z pozostałymi. Doświadczenia były robione przy zwarciu ednofazowym i trójfazowym. Kilka doświadczeń wykonano z uzwojeniem jednej fazy bez rdzenia żelaznego. Prąd zwarcia był mierzony tylko po stronie pierwotnej. Choć przy zwarciu bez rdzenia amperozwoje wtórne są częstokroć znacznie mniejsze, niż pierwotne, to porównanie oporności zwarcia w tablicy A w doświadczeniach bez rdzenia i wraz z nim wskazuje nieznaczną różnicę, mającą miejsce w danym wypadku. Ponieważ oporności rzeczywiste zwarcia obu uzwojeń były niemal równe po przeliczeniu na równą ilość zwojów, więc można było przypuszczać, że prądy w obu uzwojeniach były przesunięte o ok.  $180^\circ$  w fazach.

Unoszenie się zwojnicy skrajnej ponad stan normalny, t. j. odstęp  $b$  (rys. 2), było niejednokrotnie nierówne, t. j. jeden bok unosił się więcej, niż drugi. W tych wypadkach przez ustawienie ciężarków wyrównywano to tak, aby w trzech miejscach na obwodzie otrzymać wartości przybliżone. Odstęp  $b$  unoszenia był mierzony w trzech miejscach na obwodzie zwojnicy jednocześnie tak, iż podana w tablicy liczba jest średnią z trzech odczytów. Większa dokładność tego pomiaru była utrudniona z powodu lekkiego drżenia zwojnic.

Stosowany prąd od 33 do 51,8 A znacznie przewyższał prąd znamionowy 5,96 A i dlatego doświadczenia musiały trwać krótko, gdyż uzwojenia podlegały nagrzaniu, które zwiększało silnie oporność rzeczywistą, a więc i oporność pozorną zwarcia oraz napięcie zwarcia. Napięcie, podane w tablicy A, jest to napięcie przyłożone do końców uzwojenia pierwotnego, t. j. wysokonapięciowego. Siła podana



Rys. 1.

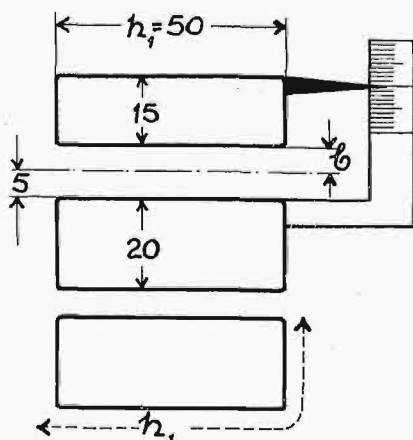


Tablica A.  
Zwarcie jednofazowe.

Doświadczenie		bez rdzenia żelazn.					na rdzeniu			Uwagi
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Napięcie V	277	300	335	430	490	370	400	400	Wielkości mierzone
2	Prąd w pierwotn. A	33	33	40	46	50	45,5	49,2	51,8	
3	Siła kg	8,15	6,14	12,10	12,15	11,15	12,75	12,75	22,75	
4	Odstęp „b” w cm	0,10	0,60	0,10	0,60	2,50	0,70	0,90	0,05	
5	Oporność $Z_z$ Ω	8,40	9,10	8,38	9,35	9,80	8,13	8,13	7,72	Wielkości obliczone
6	Napięcie zwarcia $e_z$ %	2,89	3,13	2,89	3,22	3,37	2,81	2,80	2,66	
7	Odstęp „a” ze wzoru 9-go cm	2,35	2,85	2,35	2,85	4,75	2,95	3,15	2,30	
8	Siła ze wzoru 9-go kg	8,12	6,72	12,20	13,10	9,30	12,40	13,55	20,4	
9	Siła ze wzoru 41-go kg	11,05		16,30					24,00	
10	Siła ze wzoru 44-go kg	13,30		19,20					30,20	

jest sumą wagi ciężarków wraz z wagą samej zwojnicy unoszonej.

Z porównania danych tablicy A daje się zauważyć, że przy jednakowym uniesieniu, t. j. równych odstępach  $b$ , siły są niemal proporcjonalne do kwadratu prądów, co jest do



Rys. 2.

pewnego stopnia sprawdzianem dokładności pomiarów. Np. w doświadczeniach 1, 3 i 8-mem:

$$8,15; 12,15; 22,75 \text{ jak } 33^2; 40^2; 51,8^2$$

Pewną różnicę w doświadczeniu 8-mem spowodowało przypuszczalnie sprężynowanie izolacji między zwojnicami; siła ta dodawała się do siły odpychania.

Dane pierwszych czterech wierszy w tablicy A są wzięte z doświadczeń, dane zaś pozostałych — obliczone. Podana w wierszu 5-tym oporność pozorną zwarcia stanowi iloraz napięcia przez prąd. Napięcie zwarcia w wierszu 6-tym obliczone jest przy prądzie znamionowym 5,96 i napięciu 1730 V, t. j. napięciu fazowemu, pg. wzoru:

$$e_z = \frac{V_z}{I_z} \frac{5,96}{1730} \dots \dots \dots (47)$$

W powyższym  $V_z$  jest napięciem z wiersza 1-go, a  $I_z$  — prądem z wiersza 2-go tablicy A.

W wierszu 7-ym odstęp  $a$  był wzięty między środkami zwojnic, równał się więc:

$$a = 0,75 + 1,0 + 0,5 + b \text{ cm} \dots \dots (48)$$

Dane wiersza 8-go, t. j. siła określona pg. wzoru 9-go:

$$F = \frac{0,2 i_1 i_2 l}{10 a} \text{ dyn} \dots \dots \dots (9)$$

Powyższy wzór podany został przez G. Benischke'go, jako podstawowy do obliczeń sił mechanicznych, działających między dwoma przewodami prostoliniowymi i równoległymi, znajdującymi się w odstępnie  $a$  cm. Dla wypadku, gdy szerokość wieńca zwojnicy  $h_1$  jest mała w stosunku do średnicy, G. Benischke na str. 240 „Arch. f. Elektr. 22 B, 3 Heft, 1929” podaje wzór 5-ty, który przy stosowaniu tu znakowaniu wyraża się:

$$F_0 = \frac{0,2 (iz)^2 l_s}{10 a m^2} \text{ dyn} \dots \dots \dots (9a)$$

Przy wyznaczeniu zaś sił w kg i prądów w wartościach skutecznych powyższy wzór przekształci się w następujący:

$$F_0 = \frac{0,204 (Iz)^2 l_s}{a m^2 10^7} \text{ kg} \dots \dots \dots (9b)$$

Ze wzoru 9b przy  $I$  pg wiersza 2-go,  $l_s = 61,2$  cm, a pg wiersza 7-go  $m = 6$  zostały obliczone siły. Dane wiersza 8-go są mocno zbliżone, nieco większe lub mniejsze od mierzonych wielkości, co jest tem dziwniejsze, iż przy doświadczeniach zupełnie nie brane były w rachubę rozważania G. Benischke'go, a obliczenia podane tu były dokonane w kilka miesięcy po wykonaniu doświadczeń. Może to być tylko zbiegiem okoliczności, że dla typu KP 180 SSW wzór G. Benischke'go jest przypadkowo najściślejszy, lub też, że wzór ten wogóle jest najściślejszy dla uzwojeń krążkowych. Jest znamienne również, że wzór ten jest zgodny z danymi doświadczenia przy większych odstępach  $b$ , t. j. przy większym uniesieniu się zwojnicy i w tym wypadku daje prostą zależność między siłami i prądem.

Doświadczenia wykazały, że siły szybko maleją przy unoszeniu się zwojnic, co jest ważne dla konstruktorów. Zmniejszenie się powoduje powiększenie się odstępu  $b$  oraz, w mniejszym stopniu, zwiększenie się oporności zwarcia. Pewne sprężyste umocowania mogą tu skutecznie przeciwdziałać siłom zwarcia, pozwalając na nieznaczne rozsuniecie się zwojnic przy zwarcu i przesuwając zwojnice na swe miejsca, gdy zwarcie ustanie.

Wzory M. Vidmara dotyczą uzwojeń w położeniu normalnym, t. j. przy odstępie  $b = 0$ . Ponieważ doświadczalnie trudno było określać siły przy odstępie  $b = 0$ , więc dla porównania w wierszu 9 i 10-tym tablicy siły te zostały obliczone tylko dla warunków doświadczeń 1 i 3-go, w których odstęp  $b = 1$ , oraz doświadczenia 8-go przy odstępie  $b = 0,5$  mm. Jak to już było wspomniane, odstęp 0,5 mm jest w warunkach wykonywanych doświadczeń zbyt mały. Z doświadczeń przy różnych odstępach i różnych prądach, przyjmując tylko proporcjonalność sił do kwadratu prądów, można wyliczyć te siły przy odstępie  $b = 0$ ; będą one tylko nieco większe, niż przy odstępie  $b = 1$  mm.

Wzór M. Vidmara 44-ty, służący do obliczania sił przy udarowym prądzie zwarcia, jest wyprowadzony z wzoru 41:

$$F_0 = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot (Iz)^2 l_s}{10 \cdot h_1 \cdot m^2} \text{ dyn} \dots \dots \dots (41)$$

Przyjmując, że  $m = 2q$ , a przytem

$$\frac{0,4 \cdot \pi}{10 \cdot 4 \cdot 0,981} = 0,032$$

otrzymamy:

$$F_0 = 0,032 \frac{l_s}{q^2 h_1} \left( \frac{I_z}{1000} \right)^2 \text{ kg} \dots \dots (41b)$$

Powyższy wzór jest bardzo podobny do wzoru R. Richtera:

$$F_{ouz} = 0,032 \frac{l_s}{q^2 h_1} \left( \frac{z i_{uz}}{1000} \right)^2 \text{ kg} \dots \dots (46)$$

Lecz wzór R. Richtera daje wartość dwa razy większą, niż wzór 41b, a to dlatego, że we wzorze 41b dana jest największa wartość siły w czasie połowy okresu, a wartość średnia jest o połowę mniejsza, jak to wynika z wywodów przy wzorach 12-tym i 15-tym wspomnianej wyżej pracy.

Dane wiersza 9-go tablicy A są obliczone z wzoru 41-go lub 41b przy  $l_s = 61,2 \text{ cm}$ ,  $m = 6$ ,  $z_1 = 720$ ,  $h_1 = 5,5 \text{ cm}$  dla doświadczenia 1-go i 3-go,  $6,3 \text{ cm}$  dla doświadczenia 8-go. Wartość  $h_1$  jest rozmaicie brana. M. Vidmar bierze obwód połowy przekroju wienca zwojnicy, inni zaś biorą tylko wysokość boku zwojnicy. Aby wartość tę zrobić zależną od doświadczeń, została ona wyliczona z wzoru 45-go na oporność urojoną zwarcia, przy  $R_z = 5,20$  i  $\delta = 1,66$ , wg wzoru 18-go i danych rys. 1-go i 2-go.

Wartości, otrzymane z wzoru 41-go, t. j. dane wiersza 9-go tablicy A są większe od otrzymanych z doświadczeń, oraz z wzoru G. Benischke'go: w dośw. 1-szem na 37%, w doświadczeniu 3-ciem na 35% i doświadczeniu 8-mem na 6%.

W wierszu 10-tym są podane wartości sił występujących przy danych prądach, obliczone ze wzoru 44-go M. Vidmara:

$$F_{ouz} = \frac{0,2 \cdot P \cdot 10^8}{m \delta f e_z} \text{ kg} \dots \dots (44)$$

W powyższym  $P = 30 \text{ kVA}$ ,  $m = 6$ ,  $\delta = 1,665$  wg wzoru 18-go i rys. 1-go, oraz wartości  $e_z$  podanych w wierszu 6-tym tablicy A.

Przykład obliczenia siły w doświadczeniu 1-szem:

Przy  $e_z = 2,89\%$

$$F_{ouz} = 4150 \text{ kg.}$$

Ustalony prąd zwarcia da siłę 8 razy mniejszą:

$$F_z = 518 \text{ kg.}$$

Pg wzoru 1-go ustalony prąd zwarcia:

$$I_z = \frac{5,96 \cdot 100}{2,89} = 206 \text{ A.}$$

Proporcjonalnie więc do kwadratu prądów, przy prądzie 33 A powinniśmy otrzymać siłę:

$$F_0 = 518 \left( \frac{33}{206} \right)^2 = 13,30 \text{ kg,}$$

a więc o 63% więcej, niż otrzymane z doświadczenia 8,15 kg. W doświadczeniu 3-ciem otrzymano wartość o 58%, a w doświadczeniu 8-mem — o 33% większą.

Okazuje się więc, że najprostszy wzór G. Benischke'go daje wyniki najwięcej zbliżone do doświadczeń; różnice nie przekraczają tu 10%. Wzór G. Benischke'go posiada wielką zaletę prostoty. Niestety, G. Benischke, nie podaje jaką wartość wybierać należy na odstęp  $\alpha$ . W każdym bądź razie wzór ten pozwalałby na ścisłe sprawdzenie doświadczenia i ustalenie odstępu  $\alpha$  dla różnych uzwojeń walcowych.

Warunki zwarcia trójfazowego w danym transformatorze mało różnią się od warunków zwarcia jednofazowego tegoż transformatora. Tylko przy unoszeniu zwojnicy i nierównych opornościach pozornych poszczególnych faz mogły tu następować prądy wyrównawcze, lecz siły powinny być proporcjonalne do kwadratu prądów, gdyż prądy były mierzone w fazie badanej.

W tablicy B są inne różnice pomiędzy danymi doświadczeń oraz wyliczonemi z różnych wzorów. Naogół różnice te są tu znacznie mniejsze. Największą różnicę, bo dochodzącą do 36%, wykazuje w doświadczeniu 8-mem wzór G. Benischke'go. Ponieważ w doświadczeniu 8-mem i 9-tym odstęp  $b$  był bardzo mały, więc możliwe tu mogło być też sprzężowanie izolacji. W doświadczeniach, podanych w tablicy B, wzór 41-szy daje znacznie niższe wartości, niż wzór 44-ty, a wzór G. Benischke'go — wartości niższe i wyższe od określonych pomiarami.

Uwagi. Wzór 41-szy różni się od wzoru 9-go o tyle, o ile  $h_1$  różni się od  $\pi a$ , t. j., gdyby w pewnym transformatorze

$$h_1 = \pi a,$$

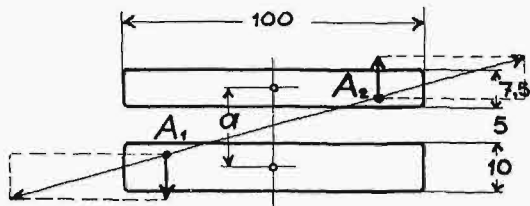
to oba wzory dawałyby wielkości sił równe. Gdybyśmy np wykonali uzwojenie o zwojnicach szerszych, tak, aby  $h_1$  dwu-

Tablica B  
Zwarcie transformatora trójfazowego.

Doświadczenia			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Uwagi
1	Napięcie	V	295	295	330	370	420	420	420	490	505	505	Wielkości mierzone
2	Prąd pierwotny	A	20,9	22,0	24,5	26,2	30	30,5	30,5	35,3	36,2	35,5	
3	Siła F	kg	2,75	4,75	4,75	4,75	4,75	5,75	7,25	12,75	12,70	8,75	
4	Odstęp „b”	w cm	0,50	0,10	0,20	0,50	0,70	0,55	0,40	0,07	0,09	0,50	
5	Oporność	$E_z \Omega$	8,15	7,75	7,80	8,17	8,09	7,95	7,95	8,02	8,05	8,21	Wielkości obliczone
6	Napięcie zwarcia	$e_z \%$	2,80	2,64	2,67	2,80	2,77	2,73	2,73	2,75	2,77	2,82	
7	Odstęp „a”	w cm	2,65	2,35	2,45	2,75	2,95	2,80	2,63	2,32	2,34	2,75	
8	Siła ze wzoru 9-go	kg	2,93	3,72	4,45	4,52	5,52	6,02	6,35	9,40	10,10	8,21	
9	Siła ze wzoru 41-go	kg		4,65						11,85	12,60		
10	Siła ze wzoru 44-go	kg		5,62						14,50	15,30		
11	Prąd zwarcia	A		223,5						216	215		

krotnie się powiększyło, to uległaby przy tem dwukrotnemu zmniejszeniu grubość zwojnic, wskutek czego zmalałaby wielkość  $a$  i wtedy wzór 41-szy dawałby wartości sił więcej, niż dwa razy mniejsze od wzoru 9-tego.

Jasne jest, że oba wzory mogą dawać zbliżone wartości tylko w pewnych przypadkach. Np. dla transformatora 30 kVA, o zwojnicach jak na rys. 3-cim, wzór 41-szy dla prą-



Rys. 3.

du 22 A, jak w doświadczeniu 2-gim tablicy B, dałby wartość 3,12 kg, wzór 44-ty — wartość 7,65 kg, a wzór 9-ty — 8 kg. Teoretyczne uzasadnienia wszystkich wymienionych wyżej wzorów posiadają pewne nieścisłości: wzór 9-ty jest właściwie ścisły tylko dla dwóch równoległych przewodów. Przewody kołowe, jak w badanych zwojnicach, wytwarzają inne strumienie linii sił, niż przewody proste, a przytem w prostokątnych przekrojach zwojnic między dowolnymi dwoma punktami obu przekrojów wytwarzają się pg wzoru 9-go siły, zależne od odstępów obu punktów i skierowane po linii, łączącej te punkty.

Ścisłe matematyczne ujęcie tak zawikłanych warunków będzie prawdopodobnie bardzo trudne, choć przybliżone — w ten czy inny sposób możliwe. Gdybyśmy np. przypuścili, że przewody są proste, t. j. zwojnice przecięte i wyprostowane z zachowaniem przekroju, jak np. na rys. 3-cim, i gdybyśmy te przekroje podzielili na drobne równoległe paski, to siły oddziaływania między poszczególnymi paskami pg wzoru 9-go byłyby odwrotnie proporcjonalne do odstępów między niemi. Lecz składowe w kierunku osi między

dwoma punktami  $A_1$  i  $A_2$  zależne byłyby od pochylenia prostej, łączącej te punkty.

W doświadczeniach tablicy A odstęp  $a$  był wzięty pg wzoru 48-go dlatego, że wzór ten dawał wartości najbliższe do danych doświadczeń, co częściowo się potwierdziło w doświadczeniach tablicy B.

Różnica między wartościami wzorów 44 i 41-go powstała wskutek tego, że wzór 44-ty został utworzony ze wzoru 41-go, jak to widoczne jest przy wzorze 20-stym, przy napięciu urojonem rozproszenia zamiast przy pozornym. Między obu wzorami istnieje więc różnica, jak między opornościami  $Z_z$  i  $X_z$ . Pozatem, jak to widoczne jest we wzorze 21-szym, czynnik 1,6 został tam zastąpiony przez 1,5. Wzory więc 44 i 41-szy będą wykazywały mniejszą różnicę w transformatorach na wyższe napięcie i wielkie moce, w których to różnica między  $Z_z$  i  $X_z$  jest znikomo mała. Ocena więc porównawczej wartości wzoru Vidmara i G. Benischke'go w naszych doświadczeniach powinna polegać na porównaniu wartości wzorów 41 i 9-go.

Podane tu doświadczenia, wykonane w sposób prymitywny, wskazują, że przypuszczalnie tylko doświadczenia ze zwojnicami rozmaitych kształtów pozwolą na ścisłejsze określenie sił zwarcia w uzwojeniach krążkowych. Doświadczenia te, jak starałem się tu wykazać, są dość łatwe do wykonania, należy mieć jedynie pewną zręczność w eksperymentowaniu oraz orjentować się nieco w rozmaitych zależnościach lub przeszkodach, zachodzących przy badaniach.

Póki więc ścisłejsze badania nie dadzą nam określonych i innych wyników, to doświadczenia, podane w tablicy A i B wskazują, że siły powstające przy zwarcu w uzwojeniach krążkowych dość ściśle są określane obliczeniami starszemi, t. j. wzorem 41-ym, nazwanym tu wzorem M. Vidmara, lub wzorem 44-ym, jeśli między  $Z_z$  i  $X_z$  jest mała różnica. Rozważania zaś wskazują, że wzór G. Benischke'go 9b będzie dawał ścisłejsze wyniki przy wąskich zwojnicach (o małych  $h_1$ ) i mniej ściśle przy szerokich, jak na rys. 3-cim.

## PRZYCZYNEK DO WYKRESU KOŁOWEGO SILNIKÓW ASYNCHRONICZNYCH WG. PROF. OSSANNY

Inż. H. PARTUM

Wyprowadzone przez autora wzory dają możliwość obliczania wielkości, występujących w silnikach indukcyjnych wielofazowych, między innymi prądu w stojanie, sprawności i  $\cos \varphi$  dla dowolnego punktu pracy, następnie mocy maksymalnej oraz stosunku między momentem maksymalnym i dowolnym. Wzory zostały wyprowadzone na mocy rysunków geometrycznych, bez żadnych nowych założeń natury fizycznej i mogą być stosowane z pożytkiem w tych wypadkach, gdzie zależy na dokładności, ponieważ przy wykresach graficznych mogą łatwiej zejść pewne niedokładności.

Wzory autora są jeszcze dość złożone; może być, iż posłużą one, jako podstawa do wyprowadzenia wzorów prostszych, opartych na danych doświadczalnych. Brak formy przejrzystej nie pozwala też na łatwą dyskusję otrzymanych rezultatów. Wzór na przeciążalność momentu jest przybliżony, prawdopodobnie autor chciał w ten sposób otrzymać prostszą formę. Tym też względem zapewne daje się wyłomaczyć, iż autor

wybrał jako parametr  $p = \frac{\text{moc maksymalna}}{\text{moc rozpatrywana}}$ , a nie  $\frac{\text{moment maksymalny}}{\text{moment rozpatrywany}}$ .

Wyprowadzone wzory dają jednak już obecnie przewagę nad metodami graficznymi, o ile idzie o obliczenia, wykonywane w dużych ilościach, a mające na celu ustalenie liczbowych zależności pomiędzy zmiennymi w pewnym rozpatrywanym zakresie, co może mieć, naprz., miejsce przy projektowaniu całej serii silników indukcyjnych.

Jako przykład takiego zastosowania wzorów, może służyć wykres Nr. 6, odtwarzający pewne zależności przy silnikach o danej mocy maksymalnej.

Warszawa, 5 listopada 1934 r.

Prof. K. Żórawski.

**Streszczenie.** Przez analityczne ujęcie najczęściej używanej konstrukcji wykresu kołowego prof. Ossanny, wyprowadzone zostają wzory na sprawność, współczynnik mocy i prąd, pobierany przez silnik asynchroniczny przy dowolnym obciążeniu pomiędzy biegiem jałowym a mocą maksymalną. Przy pewnych założeniach, upraszczających rachunek,

wyprowadzony zostaje przybliżony wzór na przeciążalność momentu.

Podane są wykresy, mające na celu ułatwienie obliczeń mocy maksymalnej i współczynnika mocy, oraz kilka przykładów zastosowania uzyskanych wzorów.





$$\eta = 1 - \frac{p \sin \varphi_z S_w \left( I_z + \frac{p-1}{p} R_w \right) - (1 - \cos \varphi_z) R_w \left[ \frac{N}{1 - \cos \varphi_z} \cdot (I_z + R_w) - \frac{I_0 \cos \varphi_0}{\sin \varphi_z} \right]}{(I_z + R_w) \left[ p \sin \varphi_z S_w + (1 - \cos \varphi_z) \left( R_b - \frac{N}{1 - \cos \varphi_z} \cdot R_w \right) \right]} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p \sin \varphi_z S_b - (1 - \cos \varphi_z) \left( R_w + \frac{N}{1 - \cos \varphi_z} \cdot R_b \right)}{p \sin \varphi_z S_w + (1 - \cos \varphi_z) \left( R_b - \frac{N}{1 - \cos \varphi_z} \cdot R_w \right)} \quad (4)$$

Dla skrócenia wzorów (3) i (4) sumy i różnice składowych watowych i bezwatowych prądów  $I_z$  i  $I_0$  zostały poznaczane pojedynczymi symbolami

$$\left. \begin{aligned} S_b &= I_z \sin \varphi_z + I_0 \sin \varphi_0 \\ S_w &= I_z \cos \varphi_z + I_0 \cos \varphi_0 \\ R_b &= I_z \sin \varphi_z - I_0 \sin \varphi_0 \\ R_w &= I_z \cos \varphi_z - I_0 \cos \varphi_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Nadto oznaczono wyraz niewymierny:

$$N = \sqrt{(1 - \cos \varphi_z) [p^2 - 1 + \cos \varphi_z (p - 1)^2]} \quad (6)$$

Wzory (3) i (4) posiadają małą wartość praktyczną, ze względu na zbyt zawiłą formę.

Biorąc pod uwagę, że sprawność silnika obliczamy zazwyczaj nie z wykresu, lecz ze strat poszczególnych, pozostawimy wzór (3) w pierwotnej formie.

Wprowadzając dodatkowe oznaczenia, możemy ze wzoru (4) obliczyć wartość współczynnika mocy:

$$\cos \varphi = z \cdot \frac{k + x \cos \varphi_0 - y \sin \varphi_0}{\sqrt{k^2 + 2 k x \cos \varphi_0 + x^2}} \quad (7)$$

We wzorze tym oznaczono:

$$k = \frac{I_z}{I_0} \quad (7a)$$

$$x = \frac{p \sin \varphi_z + N}{\cos \varphi_z (p \sin \varphi_z - N) + (1 - \cos \varphi_z) \sin \varphi_z} \quad (7b)$$

$$y = \frac{1 - \cos \varphi_z}{\cos \varphi_z (p \sin \varphi_z - N) + (1 - \cos \varphi_z) \sin \varphi_z} \quad (7c)$$

$$z = \frac{p \sin \varphi_z + N}{\sqrt{(p \sin \varphi_z + N)^2 + (1 - \cos \varphi_z)^2}} \quad (7d)$$

Znając  $\cos \varphi$  dla punktu pracy, odpowiadającego określonej wartości parametru  $p$ , możemy obliczyć prąd pobierany przez silnik przy mocy  $P_2 = \sqrt{3} U \cdot \frac{m}{p}$  ze wzoru:

$$I_1 = \frac{1}{\cos \varphi - \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[ \frac{m}{p} - \frac{I_z I_0 \sin (\varphi_0 - \varphi_z)}{I_z \sin \varphi_z - I_0 \sin \varphi_0} \right] \quad (8)$$

gdzie

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_z \cos \varphi_z - I_0 \cos \varphi_0}{I_z \sin \varphi_z - I_0 \sin \varphi_0} \quad (8a)$$

Dla każdego silnika istnieje taka wartość parametru  $p$ , przy której wyrażenie, zawarte w nawiasie kwadratowym wzoru (8), staje się równe zero.

W tym wypadku przybiera również wartość zerową wyrażenie:

$$\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha$$

i na  $I_1$  otrzymujemy wyrażenie nieokreślone  $\frac{0}{0}$ .

Omówiona zależność zachodzi przy wartości parametru:

$$p = \frac{m (I_z \sin \varphi_z - I_0 \sin \varphi_0)}{I_z I_0 \cdot \sin (\varphi_0 - \varphi_z)} \quad (8b)$$

W podanych niżej przykładach zostanie wykazane, że ze wzoru (8b) otrzymujemy zazwyczaj stosunkowo dużą

wartość parametru  $p$ , odpowiadającą małym procentowym obciążeniom silnika.

Prądy, odpowiadające parametrom o wartościach równych, lub zbliżonych do wartości, określonej przez wzór (8b), możemy obliczyć ze wzoru:

$$I_1 = \frac{1}{\sin \varphi + \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \alpha} \left[ \frac{I_z^2 - I_0^2}{2 (I_z \sin \varphi_z - I_0 \sin \varphi_0)} - \frac{m}{p} \cdot \frac{N}{1 - \cos \varphi_z} \right] \quad (8c)$$

Wzór ten daje oczywiście identyczne rezultaty ze wzorem (8), lecz jest mniej dogodny w użyciu, ze względu na obecność niewymiernego wyrażenia  $N$ , określonego przez wzór (6).

Jedną z najbardziej interesujących wielkości charakterystycznych silnika jest moment maksymalny, lub też przeciążalność momentu, wyrażona wg. oznaczeń rys. 1 stosunkiem:

$$p_\mu = \frac{M_{max}}{M_{nom}} = \frac{MM_1}{PP_2}$$

Obliczenie odcinków  $MM_1$  i  $PP_2$  jest niestety połączone z dużymi trudnościami, ze względu na konieczność wprowadzenia jeszcze jednej zmiennej — strat mechanicznych, co jest potrzebne do ustalenia rzędnej punktu  $I$ , oraz ze względu na to, że, określając przecięcie prostej  $OP_\infty$  z kołem, otrzymujemy na współrzędne punktu  $P_\infty$  nowe wyrażenia niewymierne, komplikujące wzór.

Czyniąc pewne upraszczające założenia, możemy otrzymać przybliżony wzór na długość odcinka, odpowiadającego momentowi maksymalnemu, dający dla praktycznych celów dostateczną dokładność.

W konstrukcji stosowanej przez Arnolda prostą momentów wyznacza punkt  $I$ , leżący na rzędnej punktu  $J$ , w odległości od  $J$  równej prądowi, idącemu na pokrycie strat mechanicznych  $\left( IJ = \frac{\Delta P_e}{\sqrt{3} U} \right)$ , oraz punkt  $P_\infty$ , wyznaczony przez przecięcie z kołem prostej, łączącej punkt  $O$  z punktem  $A$ .

Przyjmując za linię momentów prostą, łączącą środki rzędnych punktów  $J$  i  $Z$  i określając sposobem normalnym w stosunku do tej linii odcinek momentu maksymalnego, otrzymamy:

$$\mu = \overline{MM_1} \approx \frac{1}{2 \sin \varphi_z} \left[ \left( \frac{1}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \right) (I_z - I_0) + I_0 \sin \varphi_0 \cos \varphi_z \right] \quad (9)$$

przyczem

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha \quad (9a)$$

Biorąc dalej pod uwagę, że dla większości silników stosunek odcinków  $PP_2$  i  $PP_1$  waha się około 1,05, możemy przeciążalność momentu obliczyć z przybliżonego wzoru:

$$p_\mu = \frac{\overline{MM_1}}{\overline{PP_2}} \approx \frac{p_m \mu}{1,05 m} \quad (9b)$$

Operowanie wzorami, wyrażającymi odcinki mocy w skali prądów, jest mało obrazowe i z tego względu wygodniej jest niekiedy wprowadzić wielkości procentowe.

Przyjmijmy jako 100% prąd watowy, odpowiadający mocy znamionowej silnika  $P_{2n}$ :

$$I_n = I_{1n} \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n = \frac{P_{2n}}{\sqrt{3} U} = 100\% \quad (10)$$

Wówczas z łatwością wyrazimy w %% szereg charakterystycznych wielkości silnika:

$$\text{procentowy prąd zwarcia} \quad a = \frac{I_z}{I_n} \cdot 100\% \quad (11)$$

procentowy prąd przy biegu jałowym.  $b = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100\% \dots (12)$

procentowe straty przy biegu jałowym.  $c = \frac{I_0 \cos \varphi_0}{I_n} \cdot 100\% = \frac{\Delta P_0}{P_{2n}} \cdot 100\% (13)$

Podstawiając we wzorze (1) zamiast  $I_z$  i  $I_0$  wielkości procentowe  $a$  i  $b$ , otrzymamy moc maksymalną w procentach mocy znamionowej.

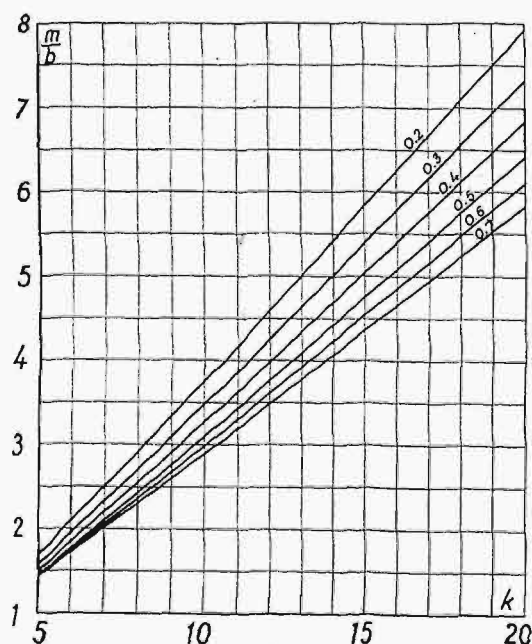
Dla otrzymania przeciążalności mocy wystarczy wtedy otrzymany procentowy rezultat  $m$  podzielić przez 100.

Wzory 8 lub 8c po zastąpieniu  $I_z$  i  $I_0$  przez odpowiednie wielkości procentowe dają na  $I_1$  wielkość, wyrażoną w % tego prądu, jakiby silnik pobierał, oddając moc znamionową i posiadając  $\eta_n = 1$  i  $\cos \varphi_n = 1$ .

Oczywiście zamiast  $\frac{m}{p}$  należy we wzorach podstawić przy obliczaniu prądu znamionowego  $I_{1n}$  — cyfrę 100, zaś przy obliczaniu prądów  $I_1$ , dla dowolnych mocy  $P_2$ , odpowiednie procentowe obciążenia:

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_{2n}} \cdot 100\%.$$

Wyprowadzone wzory umożliwiają zbudowanie wykresów, ułatwiających obliczenie niektórych wielkości.



Rys. 2.

Zależność  $\frac{m}{b} = f(k)$  dla różnych wartości  $\cos \varphi_z$ .

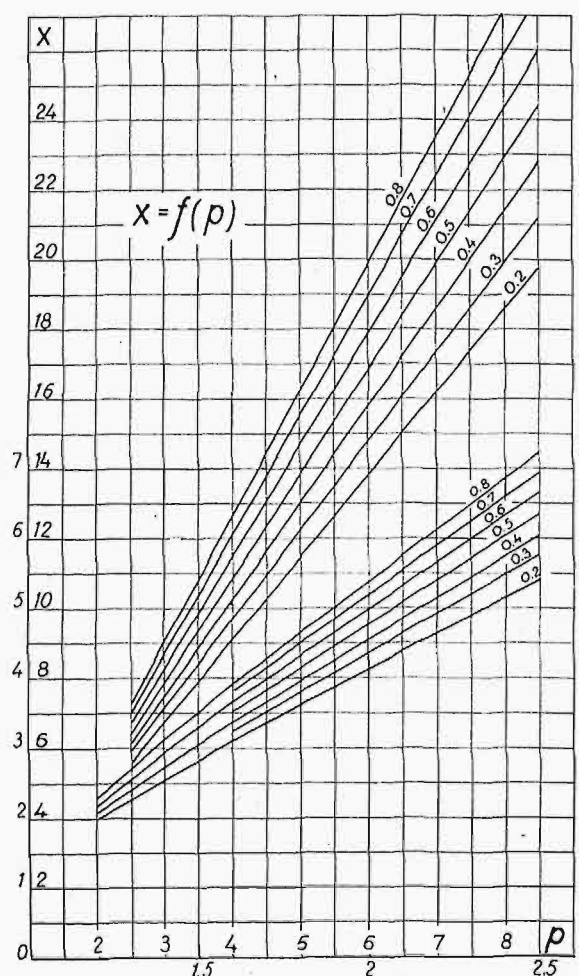
Na rys. 2 podany jest obliczony ze wzoru (1) układ krzywych  $\frac{m}{b} = f(k)$  dla różnych wartości  $\cos \varphi_z$ .

Przy obliczaniu tego wykresu przyjęto dla  $\cos \varphi_0$  stałą wartość 0,1, biorąc pod uwagę, że zmienna  $\varphi_0$  wywiera minimalny wpływ na wartość stosunku  $\frac{m}{b}$ .\*).

Rysunki 3, 4 i 5 podają wartości współczynników  $x$ ,  $y$  i  $z$ , obliczone ze wzorów 7b, 7c i 7d, i mają na celu uproszczenie obliczenia  $\cos \varphi$  ze wzoru 7.

\*) Arnold oblicza moc maksymalną ze wzoru przybliżonego, nie zawierającego zmiennej  $\varphi_0$ :

$$P_{2max} = 1,3 \cdot U \cdot \frac{I_z - I_0}{2(1 + \cos \varphi_z)} \quad (\text{tom V str. 109}).$$

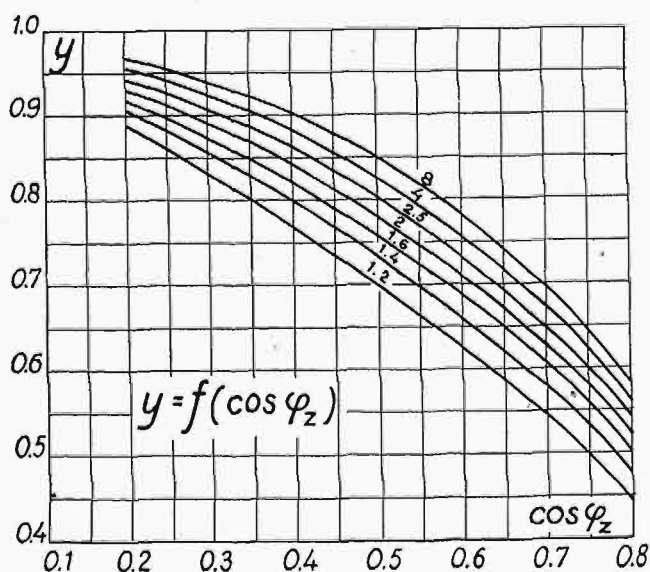


Rys. 3.

Zależność  $x = f(p)$  dla różnych wartości  $\cos \varphi_z$ .

Mając znaną z wykresu 2 przeciążalność mocy silnika  $p_m$ , będącą jednocześnie wartością liczbową parametru punktu pracy, odpowiadającego mocy znamionowej, odczytujemy z rysunków 3, 4 i 5 wartości  $x$ ,  $y$  i  $z$  dla  $p = p_m$ .

Chcąc obliczyć  $\cos \varphi$  dla innych punktów pracy, czyli



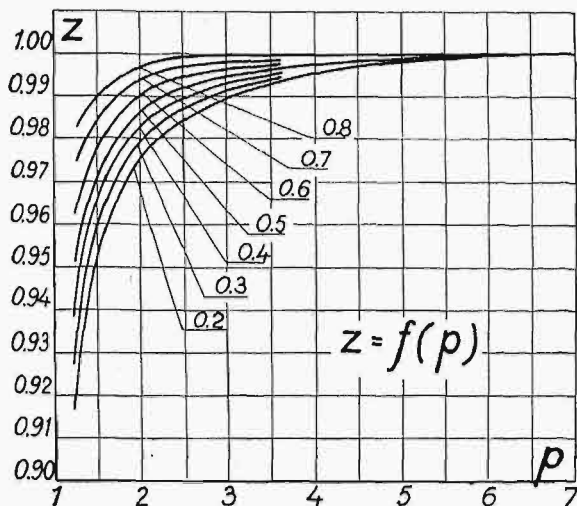
Rys. 4.

Zależność  $y = f(\cos \varphi_z)$  dla różnych wartości  $p$ .

innych obciążeń silnika, musimy odczytać wartości współczynników  $x$ ,  $y$  i  $z$  dla wartości  $p$ , określonych wzorem:

$$p = \frac{m}{\varepsilon},$$

gdzie  $\varepsilon$  jest procentowym obciążeniem silnika, wyrażonym w % mocy znamionowej.



Rys. 5.  
Zależność  $z = f(p)$  dla różnych wartości  $\cos \varphi_z$ .

Jeśli np. z wykresu 2 określiliśmy  $m = 180\%$  i chcemy odczytać współczynniki dla punktu, przy którym moc silnika wynosi  $\varepsilon = 25\%$  ( $\frac{1}{4}$  mocy znamionowej), to wartość parametru wyniesie:

$$p_{25} = \frac{180}{25} = 7,2.$$

Rysunek 6 podaje, jako jeden ze szczególnych przykładów zastosowania wyprowadzonych wzorów, układy krzywych stałej sprawności i stałego współczynnika mocy dla maszyn o dwukrotnej przeciążalności mocy ( $m = 200\%$ ) oraz dla różnych procentowych strat przy biegu jałowym ( $c = 2, 4, 6, 8$  i  $10\%$ ).

Przy pomocy tego wykresu możemy, przystępując do obliczania silnika, zgóry określić prąd zwarcia, prąd przy biegu jałowym oraz oporności omową i indukcyjną, jeśli założymy:

- moc maksymalna (w danym wypadku  $200\%$ ),
- sprawność,
- współczynnik mocy,
- straty przy biegu jałowym.

Postępowanie przy stosowaniu wykresu jest następujące: w układzie krzywych dla założonych strat przy biegu jałowym  $c\%$  odnajdujemy punkt przecięcia krzywej założonej sprawności (krzywa o charakterze prawie pionowym) z krzywą założonego  $\cos \varphi$  (krzywa skośna).

Spółrzędne punktu przecięcia określają procentowy prąd przy biegu jałowym  $b$  oraz  $\cos \varphi_z$ .

Obliczamy  $\frac{m}{b}$  i z wykresu 2 określamy odpowiednią wartość  $k$ , co skośnej pozwala obliczyć procentowy prąd zwarcia  $a$ .

Przejdzie z wielkości procentowych na ampery i obliczenie oporności przy danym napięciu jest proste i nie wymaga żadnych wyjaśnień.

#### Przykład 1.

Silnik 55 kW, 380 V, 950 obr/min.

Próba zwarcia i biegu jałowego dały:

$$\begin{aligned} I_z &= 58,5 \text{ A} & \cos \varphi_z &= 0,5 & \varphi_z &= 60^\circ & \sin \varphi_z &= 0,866 \\ I_0 &= 7,52 \text{ A} & \cos \varphi_0 &= 0,1 & \varphi_0 &= 84^\circ 15' & \sin \varphi_0 &= 0,995 \end{aligned}$$

Obliczamy:

$$I_n = \frac{5,5 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 8,36 \text{ A.}$$

$$a = \frac{58,5}{8,36} \cdot 100 = 700\%; \quad b = \frac{7,52}{8,36} \cdot 100 = 90\%; \quad k = \frac{700}{90} = 7,77.$$

$$\text{Z wykresu 2: } \frac{m}{b} = 2,38; \quad m = 2,38 \cdot 90 = 214\%; \quad p_m = 2,14.$$

$$\text{Z wykresów 3, 4 i 5: } x = 5,2 \quad y = 0,79 \quad z = 0,988$$

$$\cos \varphi_n = 0,988 \cdot \frac{7,77 + 5,2 \cdot 0,1 - 0,79 \cdot 0,995}{\sqrt{7,77^2 + 2 \cdot 7,77 \cdot 5,2 \cdot 0,1 + 5,2^2}} = 0,759$$

$$\sin \varphi = 0,65 \quad \tan \alpha = \frac{700 \cdot 0,5 - 90 \cdot 0,1}{700 \cdot 0,866 - 90 \cdot 0,995} = \frac{341}{516,5} = 0,66,$$

$$I_{1n} = \frac{1}{0,759 - 0,65 \cdot 0,66} \left[ 100 - \frac{700 \cdot 90 \cdot \cos(84^\circ 15' - 60)}{516,5} \right] = \frac{1}{0,33} [100 - 50] = 151,5\%; \quad I_{1n} = 1,515 \cdot 8,36 = 12,65 \text{ A}$$

$$\tan \beta = \frac{1}{2} \cdot 0,66 = 0,33, \quad \cos \beta = 0,95.$$

$$\mu = \frac{1}{2 \cdot 0,866} \cdot \left[ \left( \frac{1}{0,95} \right) (700 - 90) + 90 \cdot 0,5 \cdot 0,995 \right] = 281\%$$

$$P_\mu = \frac{281}{105} = 2,68.$$

Dla punktu odpowiadającego połowie mocy znamionowej, czyli  $\frac{5,5}{2} = 2,75 \text{ kW}$ :  $\varepsilon = 50\%$

$$p_{50} = \frac{214}{50} = 4,28,$$

$$x = 11,75, \quad y = 0,83, \quad z = 0,997$$

$$\cos \varphi_{50\%} = 0,997 \cdot \frac{7,77 + 11,75 \cdot 0,1 - 0,83 \cdot 0,995}{\sqrt{7,77^2 + 2 \cdot 7,77 \cdot 11,75 \cdot 0,1 + 11,75^2}} = 0,55.$$

Ponieważ dla  $\varepsilon = 50\%$  wzór (8) przybiera postać  $\frac{0}{0}$ , stosujemy do określenia prądu wzór (8c):

$$\sin \varphi_{50\%} = 0,835$$

$$N = \sqrt{(1 - 0,5) [4,28^2 - 1 + 0,5 (4,28 - 1)^2]} = 3,39.$$

$$I_{1-50\%} = \frac{1}{0,835 + 0,55 \cdot 0,66} \left[ \frac{700^2 - 90^2}{2 \cdot 516,5} - 50 \cdot \frac{3,39}{0,5} \right] = 107\%.$$

$$I_{1-50\%} = 1,07 \cdot 8,36 = 8,94 \text{ A.}$$

#### Przykład 2.

Obliczyć prąd zwarcia, prąd przy biegu jałowym oraz oporność omową i indukcyjną silnika trójfazowego o dwukrotnej przeciążalności mocy i następujących danych:

$$P_{zn} = 40 \text{ KM}, \quad U = 500 \text{ V}, \quad \eta_n = 90\%, \quad \cos \varphi_n = 0,9.$$

Straty silnika w % mocy wynoszą:

$$\frac{1 - 0,9}{0,9} \cdot 100 = 11,1\%;$$

Zakładamy stosunek strat zmiennych do stałych  $\approx \frac{1,5}{1}$ ;

Straty stałe wynoszą ok.  $\frac{11,1}{2,5} = 4,45\%$ .

Przyjmujemy  $c \approx 5\%$ .

Z wykresu (6) znajdujemy:

$$\begin{aligned} \text{dla } c &= 4\% & b &= 33,5\% & \cos \varphi_z &= 0,3 \\ \text{„ } c &= 6\% & b &= 30,8\% & \cos \varphi_z &= 0,21. \end{aligned}$$

Przez interpolację dla  $c = 50\%$  otrzymamy:

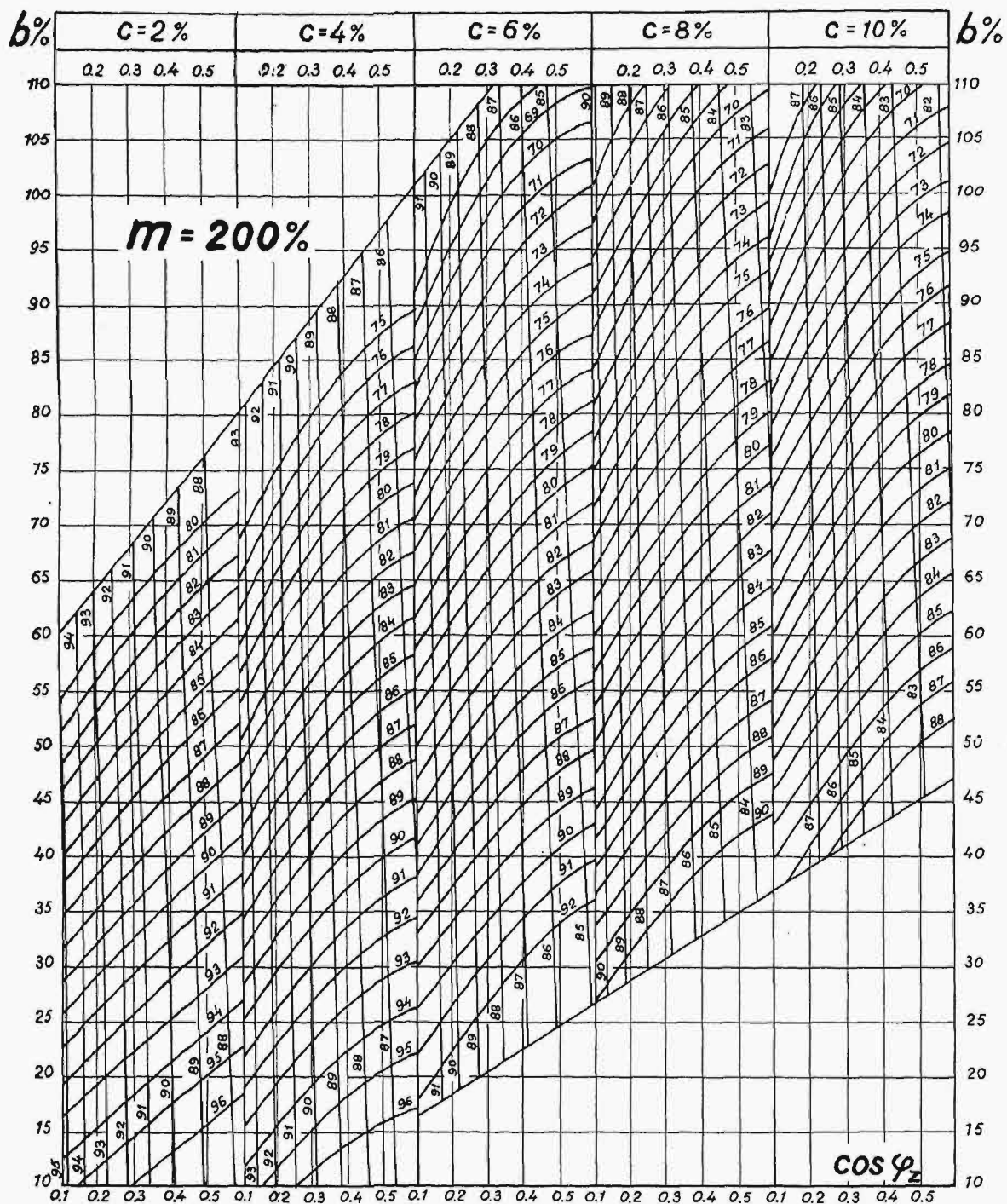
$$b = 32,15\% \quad \cos \varphi_z = 0,255$$

$$\frac{m}{b} = \frac{200}{32,15} = 6,22;$$

z rys. 1 znajdujemy:

$$k = 16,5$$





Rys. 6.  
Układy krzywych  $\eta = \text{constans}$ ;  $\cos \varphi = \text{constans}$  dla różnych wartości  $c\%$ ,  
przy stałej mocy maksymalnej  $m = 200\%$ .

czyli

$$\alpha = 16,5 \cdot 32,15 = 530\%.$$

$$I_n = \frac{50 \cdot 736}{\sqrt{3 \cdot 500}} = 42,4 \text{ A.}$$

$$I_z = 42,4 \cdot 5,3 = 225 \text{ A}$$

$$I_0 = 42,4 \cdot 0,3215 = 13,65 \text{ A.}$$

Oporność pozorną zwarcia:

$$Z_z = \frac{500}{\sqrt{3 \cdot 225}} = 1,283 \text{ } \Omega.$$

Oporność omowa:

$$R_z = 1,283 \cdot 0,255 = 0,327 \text{ } \Omega.$$

Oporność indukcyjna:

$$X_z = \sqrt{1,283^2 - 0,327^2} = 1,24 \text{ } \Omega.$$